

**UTILIZACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS BORRAS GENERADAS EN  
ESTACIONES DE SERVICIO EN EL DEPARTAMENTO DE  
CÓRDOBA.**



**JESÚS DAVID LAVERDE SARMIENTO**

**YISEL VANESSA SALAZAR FLOREZ**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**MONTERÍA, CÓRDOBA**

**2017**

**UTILIZACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS BORRAS GENERADAS EN  
ESTACIONES DE SERVICIO EN EL DEPARTAMENTO DE  
CÓRDOBA**

**JESÚS DAVID LAVERDE SARMIENTO**

**YISEL VANESSA SALAZAR FLOREZ**

**Trabajo presentado, en la modalidad de Trabajo e investigación y/o  
extensión, como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero**

**Ambiental**

**Director**

**GABRIEL ANTONIO CAMPO DAZA, Esp.**

**Grupo de Investigación de Biotecnología. Departamento de química y**

**Biología. GRUBIODEQ**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**MONTERÍA, CÓRDOBA**

**2017**

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

**Artículo 61, acuerdo N°.093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

*A Dios por darnos la vida y permitirnos culminar esta carrera,*

*A nuestros padres y hermanos por cada esfuerzo y apoyo brindado*

*Les dedicamos el esfuerzo y empeño puesto en esta investigación.*

***Agradecimientos especiales a:***

*A nuestro director Gabriel Antonio Campo Daza por apoyarnos en este proyecto y disponer de su espacio para dirigirnos y llevar a cabo esta investigación.*

*A la empresa Alquiler y Suministros por abrirnos sus puertas y permitirme realizar este trabajo de grado en sus instalaciones.*

*AL grupo de investigación de Biotecnología de la Universidad de Córdoba (GRUBIODEQ), por su apoyo brindado en este proceso.*

*A nuestros amigos Joaquín Cogollo, Esleider Arrieta y Enrique Galván por los consejos, el apoyo y la motivación brindada a lo largo de esta investigación.*

***Agradecimientos:***

*A todos los docentes que hicieron parte de nuestra formación personal y profesional, disponiendo de sus conocimientos a favor de nuestro crecimiento.*

*A nuestros compañeros y amigos Stefany Argel, Robert Rhenals y Paula Pardo por compartir momentos agradables a lo largo de nuestra vida universitaria.*

## ACRÓNIMOS

**NH<sub>3</sub><sup>+</sup>:** nitrógeno amoniacal.

**PO<sub>4</sub><sup>-</sup>:** fosfatos.

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:** nitratos.

**T:** temperatura.

**TPH:** Hidrocarburos totales de petróleo.

**NPK:** Nitrógeno, Fósforo, Potasio.

**H.A:** Humedal Artificial.

**LUZ UV:** Luz ultravioleta.

**LC:** Limite cuantificable.

**TRC:** Tasa Relativa de Crecimiento.

**DDT:** Días Después del Trasplantado

**SINA:** Sistema Nacional Ambiental.

**MAVDT:** Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	17
ABSTRACT .....	19
INTRODUCCIÓN .....	21
1. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	24
1.1 MARCO TEÓRICO .....	24
1.2 MARCO CONCEPTUAL .....	28
1.2.1 Hidrocarburos.....	28
1.2.2 Borrás .....	28
1.2.3 Tratamiento de las borras .....	29
1.2.4 Fitorremediación .....	29
1.2.5 Humedales artificiales.....	31
1.2.6 Humedales subsuperficiales.....	32
1.2.7 Degradación de hidrocarburos en humedales artificiales.....	33
1.2.8 Bioestimulación .....	33
1.2.9 Nutrientes .....	34
1.2.10 Nutrientes en la remediación de hidrocarburos.....	35
1.2.11 Plantas macrófitas .....	36



1.2.12	Typha latifolia .....	38
1.3	MARCO LEGAL .....	39
1.3.1	Decreto 3930 de 2010 .....	40
1.3.2	Decreto 4741 de 2005 .....	41
1.3.3	Decreto 1521 de 1998 .....	41
1.3.4	Decreto 321 de 1999 .....	42
1.3.5	Resolución 1170 de 1997 .....	42
1.3.6	Ley 1252 de 2008.....	42
2.	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	43
2.1	ÁREA DE ESTUDIO .....	43
2.1.1	Recolección de muestra.....	44
2.2	HUMEDALES ARTIFICIALES .....	44
2.2.1	Montaje .....	44
2.2.2	Selección de los medios .....	45
2.2.3	Selección de la especie vegetal .....	46
2.2.4	Selección de nutriente. ....	47
2.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS EN LAS UNIDADES EXPERIMENTALES .....	47
2.4	CALCULO DE LA TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO (TRC)...48	
2.4.1	Tasa relativa de crecimiento (TRC):.....	49

2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	49
2.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	51
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
3.1 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUIMICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA BORRAS.....	52
3.1.1 Temperatura(°C).....	52
3.1.2 pH.....	54
3.1.3 $\text{NH}_3^+$ .....	55
3.1.4 $\text{NO}_3^-$ .....	58
3.1.5 $\text{PO}_4^-$ .....	60
3.1.6 TPH .....	62
3.2 CACULO DE LA TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO(TRC). .....	67
3.2.1 Comparación de la TRC de la planta sin estrés de contaminante vs planta contaminadas en cada muestreo. ....	68
3.2.2 COMPARACIÓN DE LA TRC CON RESPECTO AL TIEMPO..	71
3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL EFECTO DE LOS NUTRIENTES Y LA ESPECIE VEGETAL EN LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES.....	73
3.3.1 Análisis de varianza .....	74
3.3.2 Matriz de correlación .....	75

<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>87</b>

## **LISTADO DE ANEXOS**

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1. Prueba de porosidad.....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO 2. Cálculo del volumen de agua borra vertida en el humedal artificial. ....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO 3.Formatos de muestreo para aguas contaminadas con agua borra .....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO 4.Formato de muestro para las plantas recolectadas .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO 5. Resultados del laboratorio de aguas de la universidad de Córdoba.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO 6. Resultados del laboratorio de toxicología y gestión ambiental de la universidad de Córdoba .....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO 7. Pruebas estadísticas paramétricas .....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO 8. Evidencias de la investigación realizada.....</b>	<b>108</b>

## LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores, Niveles y tratamientos. ....	50
Tabla 2. Variación de la temperatura (°C) en cada muestreo.....	53
Tabla 3. Variación del pH durante cada muestreo. ....	54
Tabla 4. Variación de $\text{NH}_3^+$ durante cada muestreo.....	56
Tabla 5. Variación de $\text{NH}_3^+$ en las unidades experimentales que contaron con la adición de nutriente durante cada muestreo. ....	56
Tabla 6. Variación de $\text{NO}_3^-$ durante cada muestreo. ....	58
Tabla 7. Variación de $\text{PO}_4^-$ durante cada muestreo.....	60
Tabla 8. Variación de TPH durante cada muestreo. ....	63
Tabla 9. Porcentaje de remoción de TPH .....	64
Tabla 10. Calculo de tasa de crecimiento relativo de una planta sin estrés de contaminante vs plantas sin nutrientes expuestas a contaminante en cada muestreo. ....	68
Tabla 11. Calculo de tasa de crecimiento relativo de una planta sin estrés de contaminante vs plantas con nutrientes expuestas a contaminante en cada muestreo. ....	69
Tabla 12. Calculo de tasa crecimiento relativo para las plantas de la unidad experimental con nutriente.....	71
Tabla 13. Calculo de tasa crecimiento relativo para las plantas de la unidad experimental sin nutriente.....	72

<b>Tabla 14. Análisis de varianza .....</b>	<b>74</b>
---	-----------

<b>Tabla 15. Matriz de Correlación. ....</b>	<b>75</b>
--	-----------

## LISTADO DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Variación de la temperatura (°C) durante cada muestreo.....	53
Gráfica 2. Variación del pH durante cada muestreo. ....	55
Gráfica 3. Variación de $\text{NH}_3^+$ en las unidades experimentales que contaron con la adición de nutrientes durante cada muestreo.....	57
Gráfica 4. Variación de $\text{NO}_3^-$ en las unidades experimentales que contaron con la adición de nutrientes durante cada muestreo.....	59
Gráfica 5. Variación de $\text{PO}_4^-$ en las unidades experimentales que contaron con la adición de nutrientes durante cada muestreo.....	61
Gráfica 6. Variación de TPH durante la fase de muestreo. ....	63
Gráfica 7. Porcentaje de remoción de TPH .....	65
Gráfica 8. Relación entre las variables de TPH-T(°C).....	66
Gráfica 9. Relación entre las variables de TPH-pH.....	67
Gráfica 10. Variación de la TRC de las plantas sin estrés en función a las plantas contaminadas a diferentes a diferentes tiempos. ....	70
Gráfica 11. Variación de TRC en las plantas con respecto al tiempo. ....	73
Gráfica 12. Comportamiento de la remoción de TPH por tratamiento.....	74

## **LISTADO DE FIGURAS**

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1. Clasificación de los humedales con plantas macrófitas.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 2. Localización del invernadero en la facultad de Ciencias Agrícolas</b> <b>.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 3. Esquema del humedal artificial.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 4. Recolección de la especie vegetal Typha latifolia.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 5. Nutriente NPK 15-15-15.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 6. Sistema de humedales artificiales.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 7. Diferencia presentada en el agua en los humedales con nutriente</b> <b>y sin nutriente. ....</b>	<b>64</b>



## RESUMEN

Los residuos peligrosos como las aguas borras generadas en los tanques de almacenamiento de la industria del petróleo, son hoy en día uno de los problemas ambientales más graves a nivel mundial. Una de las alternativas para la remediación de las aguas contaminadas con este compuesto es la biorremediación utilizando humedales artificiales para su tratamiento. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial para la remoción de TPH presentes en las aguas borras producto de las estaciones de servicio, también se determinaron las concentraciones de Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH,  $[\text{NO}_3^-]$  ppm,  $[\text{NH}_3^+]$  ppm y  $[\text{TPH}]$  ppm,  $[\text{PO}_4^-]$  ppm y la tasa relativa de crecimiento (TRC) de la especie vegetal durante las fases de muestreo. El sistema estuvo compuesto de cuatro (4) humedales artificiales, dos (2) sembrados con la especie vegetal *Typha latifolia* y dos (2) con adición de nutriente NPK 15-15-15, inicialmente se realizó un proceso de adaptación de la especie vegetal durante un periodo de dos (2) semanas y posteriormente se llevaron a cabo tres (3) fases de muestreo en cada unidad experimental. Los resultados arrojaron que el sistema de humedales artificiales fue eficiente en la

remoción de TPH, el humedal que mayor porcentaje de remoción alcanzó al finalizar el experimento fue aquel con planta con nutriente (CPCN) con un porcentaje de 94,9 %, en segundo lugar, encontramos el humedal sin planta y con nutriente (SPCN) con un porcentaje de 94,1%, en tercer lugar, encontramos el humedal sin planta y sin nutriente (SPSN) con un porcentaje de 91,9% y en cuarto lugar encontramos el humedal con planta y sin nutriente (CPSN) con un porcentaje de remoción de 83,7%. Los análisis estadísticos concluyeron que no se presentaron diferencias significativas para un  $p < 0,05$  entre ellos. En conclusión, las cuatro (4) unidades experimentales resultaron eficientes para remoción de TPH en aguas borras.

**Palabras Claves:** Biorremediación, aguas borras, hidrocarburos, humedal artificial.

## **ABSTRACT**

Hazardous waste such as those generated from liquid fuels in storage tanks of the oil industry, are today one of the most serious environmental worldwide problems. One of the alternatives for the remediation of water contaminated with this compound is by bioremediation using artificial wetlands for its treatment. The objective of this study was to evaluate the efficiency of an artificial subsurface flow wetland system for the removal of TPH present in the water of the service stations, it also determined the concentrations of Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH,  $[\text{NO}_3^-]$  ppm,  $[\text{NH}_3^+]$  ppm y [TPH] ppm,  $[\text{PO}_4^-]$  ppm and the Relative growth rate (RGR) of plant species during the sampling phases. The system was composed by four (4) artificial wetlands, two (2) planted with the species *Typha latifolia* and two (2) with NPK nutrient addition 15-15-15, initially a process of adaptation for the plant species was carried out during a period of two (2) weeks; and subsequently three (3) sampling phases were carried out in each experimental unit. The results showed that the artificial wetland system was efficient in the removal of TPH, the wetland that had the highest percentage of removal at the end of the experiment was the one with plant and nutrient (CPCN) with a percentage of 94.9%. In second place, we found the wetland without plant and

with nutrient (SPCN) with a percentage of 94,1%, in third place we found the wetland without plant and without nutrient (SPSN) with a percentage of 91.9% and in the fourth place we found the wetland with plant and without nutrient (CPSN) with a removal percentage of 83.7%. Statistical analysis concluded that there were no significant differences for  $p < 0.05$  between them. In conclusion, the four (4) experimental units proved to be efficient for the removal of TPH in the waste water generated from liquid fuels.

**Keywords:** Bioremediation, waste water, hydrocarbons, artificial wetland.

## INTRODUCCIÓN

En la industria del petróleo, se denominan borras a todos aquellos residuos altamente viscosos conformados por agua, sólidos inorgánicos (arena, rocas, lodos de perforación), materia orgánica e hidrocarburos, especialmente de cadena largas, que se sedimentan y aglomeran después de largos periodos de tiempo en zonas del proceso de extracción y transporte con velocidades reducidas. La acumulación de borras causa una reducción en la capacidad instalada de almacenamiento, así como un aumento de las pérdidas por fricción en tuberías, con el aumento en el gasto energético de bombeo y una reducción del caudal operativo del mismo (Suàrez 2011).

Los hidrocarburos totales derivados del petróleo (HCTP) están comprendidos por compuestos parafínicos, naftalénicos y aromáticos, los cuales, a pesar de su alto peso molecular, cuentan con un gran potencial de absorción y son más fácilmente degradados y mineralizados bajo condiciones aerobias (Imfeld et al. 2009). Estos compuestos y sus derivados (gasolina, keroseno, aceites, combustibles y parafinas, asfaltos, entre otros) si bien, son muy usados en procesos industriales, domésticos, agrícolas y de transporte, también generan aportes contaminantes al agua. Los combustibles de mayor uso (diésel, gasolina corriente, entre otros)

se caracterizan por la presencia de una gran variedad de hidrocarburos que contienen múltiples componentes orgánicos con diferentes grados de solubilidad, de allí que su comportamiento difiera uno de otro (Kamath et al. 2004).

A lo largo de los años, la explotación, producción, transporte, almacenamiento y comercialización de hidrocarburos del petróleo y sus derivados, se han convertido en una problemática ambiental debido a los grandes vertimientos de combustibles que se generan. Las complejas características que presentan estos compuestos los ha clasificado como contaminantes primarios (USEPA 2000), debido a su solubilidad en el agua pueden ser fácilmente movilizados, incrementando la posibilidad de ser incorporados en otros ambientes, ingeridos por el hombre y dar origen a enfermedades (ATSDR 1999). Estos compuestos principalmente en las estaciones de servicio no reciben un adecuado tratamiento cuando son expuestos al suelo o agua (con las especificaciones técnicas necesarias) y por lo tanto, son dispuestos de forma no idónea. Lo anterior conduce a problemas de contaminación por escurrimiento de aguas que posteriormente, se dirigen al alcantarillado en zonas urbanas, y al suelo o quebradas en zonas rurales. Del mismo modo, en los casos de eventuales derrames de combustibles, generalmente estos son lavados y el agua producto de esta limpieza, finalmente llega a las fuentes hídricas de las cuales se realiza el abastecimiento humano (Cubillo 2011).

Los humedales construidos son sistemas de depuración cuyos componentes principales son el sustrato, la vegetación y el agua, que se caracterizan por su simplicidad de operación, un bajo o nulo consumo energético, una baja

producción de residuos, un bajo impacto ambiental auditivo y una buena integración al medio ambiente. La vegetación del humedal presenta su ciclo de crecimiento natural, culminado éste comienza a decaer y se va degradando, comunicando un aporte extra de materia orgánica y nutrientes al sistema, además de la recibida con el influente (Vera 2010).

Por tal motivo, este estudio evaluó la eficiencia de remoción de hidrocarburos totales, en el tratamiento de agua borra, con humedales construidos de flujo subsuperficial, utilizando bioestimulación y *Typha latifolia* como especie vegetal.

## **1. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

### **1.1 MARCO TEÓRICO**

La historia del petróleo como elemento vital y factor estratégico de desarrollo es relativamente reciente, de menos de 200 años. Se comercializó por primera vez bajo el nombre de "aceite de roca" (Samuel Kier 1850); a partir de entonces se puede decir que comenzó el desarrollo de la industria del petróleo y el verdadero aprovechamiento de un recurso que indudablemente ha contribuido a la formación del mundo actual (Vasallo y Herrera 2002).

El sector petrolero en Colombia ha tenido una importancia creciente en la economía del país en los últimos años. Este sector es estratégico para la economía por su alta participación en el producto interno bruto, porque genera un porcentaje muy alto de las exportaciones totales y porque es también una fuente muy importante de recursos fiscales para el gobierno nacional y para los gobiernos seccionales (Vargas et al. 2009).

La actividad industrial y específicamente la petrolera representan una preocupación importante en materia de salud pública para las comunidades por



la generación de residuos peligrosos de diversa índole que esta área desencadena, ejemplo de ellos son las emisiones, los metales pesados, residuos fenólicos, y lodos aceitosos tipo borras, entre otros (Gómez y Gómez 2015).

Las borras generadas en los tanques y tuberías de la industria del petróleo son residuos que se forman después de largos periodos de tiempo, por sedimentación y aglomeración de compuestos hidrocarbonados. El tratamiento de los residuos peligrosos tipo borras constituye hoy día uno de los problemas ambientales más graves a nivel mundial como el recurso agua y suelo que se han visto seriamente afectado por la mala disposición de este contaminante, por esto se han evaluado diferentes técnicas que buscan la remediación de este compuesto (Carrasco y Ore 2000).

Alguno de los sistemas más utilizados para la remediación de contaminantes son los humedales artificiales que purifican el agua mediante remoción del material orgánico (DBO), oxidando el amonio, reduciendo los nitratos y removiendo fósforo. Los mecanismos son complejos e involucran oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química (Cooper et al .1996).

Los humedales de flujo subsuperficial tienen un medio poroso o lecho (grava, arena, tierra, carbón, entre otros), que soporta el crecimiento de la vegetación emergente y participa en el tratamiento del agua residual. El nivel del agua está por debajo de la superficie del soporte y fluye únicamente a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre al agua residual, en donde las raíces penetran hasta el fondo del lecho (Osnaya 2012).

Los humedales artificiales emplean un sistema de fitodepuración de aguas contaminadas donde se desarrolla un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo et al. 2010).

Como una posible solución a las descargas líquidas generadas en las estaciones de servicio se evaluó la aplicabilidad de la fitoremediación como alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos (HC) procedente del petróleo donde los humedales construidos con matriz de suelo demostraron remover hidrocarburos totales de petróleo, logrando eficiencias de remoción superiores al 92 % ( $p < 0.05$ ). Los humedales con medio filtrante no presentaron diferencias significativas en las tasas de remoción de nitrógeno (Cubillos 2011).

La aplicación de nutrientes como NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) y bacterias en el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos han resultado eficientes, con remociones de más de 90%. En el departamento de Córdoba, se demostró la tolerancia a aguas borras por consorcios bacterianos asociados a lagunas de oxidación de borras con ensayos de biodegradación in-vitro, con Agua al 10% de Borras + consorcio + NPK, con una proporción de nutrientes de  $C=100$ ,  $N=1$ ,  $P=0,1$  y  $K=0,01$  (Salazar 2015). Igualmente, en el departamento de Santander se demostró que la utilización de bioestimulación y bacterias nativas y comerciales en sedimentos contaminados con hidrocarburos, han sido

eficiente en un 48%, sin embargo, tampoco se presentan diferencias estadísticas significativas entre las dos técnicas. (Dueñas y Santos 2006), así también estudios demuestran que los microorganismos son más tolerantes a concentraciones de agua borra de 7,5% (Mezquida et al. 2009).

También en el departamento de Risaralda, se han realizado estudios utilizando estas estrategias de bioaumentación y bioestimulación para el tratamiento de sedimentos contaminados con hidrocarburos utilizando como especie vegetal, *Typha latifolia* y la aplicación de nutrientes triple 15 conservando una relación de 100:10:1, donde se demostró la tolerancia a los HTP, con remoción hasta del 90%, sin embargo, las dos estrategias de biorremediación, no presentan diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ) (Pulgarin 2012).

Al igual que en Colombia, en el ámbito internacional se han realizado estudios similares de biorremediación de hidrocarburos. En Argentina, se realizaron estudios para optimizar los parámetros de humedad, temperatura y relación de nutrientes para estimar la posibilidad de aplicar la técnica de biorremediación en un suelo contaminado con hidrocarburos, donde se indicó que la mineralización de hidrocarburos fue óptima para humedades de 10% a 20% y a temperaturas de 25°C a 37°C con valores de producción de CO<sub>2</sub> de 3000 a 4500 mgCO<sub>2</sub> kg. La relación óptima C: N: P fue de 100:1:0,1 en la que se observó el mayor consumo de oxígeno y la remoción de 83% de los hidrocarburos totales determinados por cromatografía gaseosa, con 78% y 89% de eliminación de los hidrocarburos n-alcanos y poliaromáticos, respectivamente (Acuña et al. 2012).

Basado en estas investigaciones, surge la necesidad de evaluar el porcentaje de remoción de hidrocarburos totales de petróleo, en sistemas de tratamiento como los humedales artificiales, utilizando bioestimulación para comparar sus resultados y eficiencia para tratar este tipo de aguas.

## **1.2 MARCO CONCEPTUAL**

### **1.2.1 Hidrocarburos**

El petróleo es un recurso natural no renovable, es el resultado de la degradación anaeróbica de materia orgánica, durante largos períodos de tiempo y bajo condiciones de alta temperatura y presión, que la convierte en gas natural, crudo y derivados del petróleo. El petróleo es una mezcla extremadamente compleja y variable de compuestos orgánicos, donde la mayoría de los ellos son hidrocarburos, que varían en peso molecular desde el gas metano hasta los altos pesos moleculares de alquitranes y bitúmenes (Vargas et al. 2004).

Los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) son una mezcla de todos los hidrocarburos (HCs) presentes en el suelo y su medida puede ser usada para valorar el grado de contaminación y monitorear el proceso de bioremediación de gasolina, aceites, lubricantes, diésel, disolventes y demás contaminantes ambientales (Khaitan et al. 2001).

### **1.2.2 Borrás**

Las borras son generadas en los tanques y tuberías de la industria del petróleo son residuos que se forman después de largos periodos de tiempo, por

sedimentación y aglomeración de compuestos hidrocarbonados, especialmente de cadenas más largas, presentes en el crudo. La borra está compuesta en general por hidrocarburos parafínicos, asfaltenos, compuestos de azufre, óxidos metálicos, gases disueltos, sólidos, sedimentos (rocas, arena, lodos de perforación, entre otros) y materia orgánica, y agua (Suárez 2011).

### **1.2.3 Tratamiento de las borras**

Las borras se distinguen en tres fases cómo son fase aceite, fase acuosa y fase sólidos, teniendo en cuenta la eficiencia y el grado de especialización, el tratamiento puede ser clasificado en tratamiento primario, secundario y terciario. Dentro de esta clasificación, los métodos aplicados suelen ser métodos físicos, métodos químicos, métodos térmicos o métodos biológicos. De la aplicación de uno o la combinación de estos métodos depende el éxito del tratamiento de la borra. De tal manera que muchos investigadores han concentrado sus esfuerzos en desarrollar estas técnicas con el objetivo único de lograr un tratamiento y una disposición adecuada de estos desechos con el mínimo impacto posible al medio ambiente y a las personas (Suárez 2011).

### **1.2.4 Fitorremediación**

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas. La fitorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes (Kelley et al. 2000).

De manera más completa, la fitorremediación puede definirse como una tecnología sustentable que se basa en el uso de plantas para reducir in situ la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, sedimentos, agua, y aire, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes (Delgadillo et al. 2010).

Para el caso de los hidrocarburos la fitorremediación se refiere al uso de las plantas con capacidad para remover contaminantes y con resistencia para crecer en suelos contaminados con HPT. Estas plantas son capaces de fitodegradar y estimular a poblaciones de microorganismos en los sistemas rizoféricos. Se ha demostrado que las plantas pueden metabolizar o inmovilizar hidrocarburos de petróleo, por medio de numerosos procesos como la oxidación metabólica o la co-oxidación, dependiendo de los niveles de concentración de hidrocarburos. En condiciones de concentraciones bajas de toxicidad el sistema rizoférico proporciona condiciones nutricionales y de aireación favorables para el aumento de las poblaciones y la diversidad de flora; en el caso de altas concentraciones de hidrocarburos se puede afectar la exudación de la raíz, los factores de crecimiento y los ácidos orgánicos con el consiguiente rompimiento con el equilibrio rizoférico, la disminución de microorganismos totales, así como bacterias asimiladoras de nitrógeno y fijadores de nitrógeno atmosférico (Pérez et al. 2002).

### **1.2.5 Humedales artificiales.**

Los humedales construidos son definidos como ecosistemas naturales intermedios, entre un medio acuático y terrestre, donde el nivel del suelo se mantiene saturado por agua la mayor parte del tiempo. Estos sistemas fueron creados por el hombre con base en los resultados de investigaciones efectuadas para el tratamiento de aguas residuales y con el fin de simular los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en un humedal natural (Cubillos 2011). Los sistemas naturales son diseños ambientalmente amigables, y han sido aplicados por más de tres décadas para incrementar el rango de tecnologías que proporcionan soluciones para el manejo del recurso hídrico (Todd et al. 2003).

Los humedales construidos han demostrado ser excelentes tratamientos para la descontaminación de aguas bajo diferentes condiciones climáticas (Reed et al. 1995), porque la presencia de plantas y su interacción con los microorganismos asociados a la zona radicular, permiten la generación de procesos físicos, químicos y biológicos que mejoran la calidad del agua; estos sistemas pueden retener una gran variedad de compuestos orgánicos, así como sedimentos y metales pesados, por lo que funcionan como digestores de materia orgánica y purificadores biológicos de aguas contaminadas (Vélez y Paredes 2010).

Los humedales construidos generalmente han sido clasificados de acuerdo al tipo de flujo que presentan, tradicionalmente lo han catalogado como humedales de flujo superficial (nivel del agua por encima de la superficie del suelo) y flujo subsuperficial (nivel del agua por debajo de la superficie del suelo) (Cubillos 2011).

### **1.2.6 Humedales subsuperficiales.**

Los humedales de flujo subsuperficial se diseñan y construyen para que el agua fluya a través de la zona radicular de la vegetación y por lo tanto no presentan una superficie libre de flujo. Este sistema consiste en una excavación que contiene un lecho de material filtrante que generalmente es grava, el cual soporta el crecimiento de la vegetación emergente. En esencia, un humedal de flujo subsuperficial se clasifica como un sistema de tratamiento de película fija (Peña et al. 2003).

Este sistema es utilizado como tratamiento de las aguas residuales. En este tipo de humedal se pueden destacar las siguientes ventajas:

- No existen problemas de vectores; mientras el nivel subsuperficial del agua se mantenga.
- Poseen un alto potencial de asimilación por unidad de área en comparación con los sistemas de flujo superficial, debido a que el medio provee una mayor superficie de contacto, por lo tanto, requiere una menor área para tratar el mismo caudal.
- No hay riesgo que el público y animales entren en contacto con el agua residual, parcialmente tratada (Rubio y Paez 2009).

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales. La remoción de contaminantes en estos sistemas, ocurre debido al contacto de los microorganismos adheridos a las raíces de las plantas y medio filtrante con los compuestos presentes en el agua residual. Los humedales de flujo subsuperficial son más efectivos que los de flujo



superficial, existe menos proliferación de vectores y presenta mayor área superficial para la creación de la biopelícula debido al medio filtrante, lo cual mejora las reacciones que allí ocurren y la efectividad del humedal, sin embargo, son susceptibles a sobrecargas y obstrucciones del medio filtrante, reduciendo su eficiencia en el tratamiento (Moncada 2016).

### **1.2.7 Degradación de hidrocarburos en humedales artificiales**

La degradación de hidrocarburos en sistemas de humedales puede ocurrir no solo por parte de asimilación por parte de las plantas, sino también de la actividad aerobio y anaerobio de los microorganismos que en estos se encuentre, siendo esta última la que mayor aporte realiza en la descomposición de estos complejos compuestos. Las comunidades bacterianas asociadas a las raíces de las plantas en un humedal, según la disposición de oxígeno y nutriente, toman de los compuestos orgánicos mediante el rompimiento de sus cadenas de carbono, la energía suficiente para su desarrollo y creación de nueva biomasa; por lo tanto, entre más larga sea la estructura molecular del hidrocarburo, más difícil es el proceso de degradación para los microorganismos (Cubillos 2011).

### **1.2.8 Bioestimulación**

Consiste en la introducción de modificaciones en el medio, mediante el aporte de nutrientes, aireación y otros procesos. En ocasiones será suficiente añadir oxígeno mediante aireación, aunque en otros se podría requerir la adición de

nutrientes o ajustes de pH. En todo caso, estas aproximaciones son válidas siempre y cuando los microorganismos autóctonos sean capaces de degradar el contaminante tras un proceso más o menos largo de aclimatación previa. En lo que se refiere a la adición de nutrientes, la biorremediación requiere que estos entren en contacto con el área impregnada por el contaminante y que su concentración sea suficiente para soportar el crecimiento máximo previsto de la población degradadora en el transcurso de las operaciones de remediación (Salazar 2015). Puede darse por medio de fertilizantes orgánicos o inorgánicos y ha demostrado ser una estrategia efectiva especialmente en lugares donde la cantidad de nutrientes es escasa para el crecimiento de los microorganismos; con esta técnica se aumenta de tres a cinco veces la tasa de degradación (Narváez 2005).

### **1.2.9 Nutrientes**

Los nutrientes son uno de los factores más relevantes por ser sustancias químicas necesarias para la actividad microbiana y metabólica de los microorganismos, por lo que estos constituyentes se deben encontrar disponibles para su asimilación y síntesis, las disponibilidades de estos aumentan la eficiencia y el buen desarrollo de la bioremediación (Gómez et al. 2008).

Los nutrientes se dividen en dos grandes grupos: macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes de mayor importancia metabólica se encuentran; el carbono (C) en este caso los hidrocarburos como contaminantes proporcionan la energía necesaria para la fabricación de compuestos celulares y

productos metabólicos (dióxido de carbono, agua, enzimas); el Nitrógeno (N), forma parte principal de las biomoléculas de las células, es un elemento necesario para la producción de aminoácidos, proteínas, enzimas, ácidos nucleicos y otros constituyentes celulares. En ocasiones la utilización de estos nutrientes es rápida, los suelos no alcanzan a cubrir todas las necesidades, siendo un factor limitante para la degradación, por lo cual se puede incorporar fertilizantes de uso agrícola como urea o sulfato de amonio y de origen orgánico como estiércol, para acelerar el proceso de bioremediación (Gómez et al. 2008).

La toma y asimilación de nutrientes por parte de las plantas se debe a procesos de transformación del nitrógeno de forma inorgánica a compuestos orgánicos que sirvan para la formación de células y tejidos nuevos, por lo tanto, el potencial de toma de nutrientes por parte de las macrófitas es limitado a su tasa de crecimiento y concentración de nutrientes en sus tejidos (Cubillos 2011).

#### **1.2.10 Nutrientes en la remediación de hidrocarburos**

En la biodegradación de un suelo o agua contaminada con hidrocarburos, el aumento de la cantidad de carbono puede crear insuficiencias de nitrógeno y fósforo, debido a su inmovilización por procesos microbianos y a los requerimientos que tienen los microorganismos y las plantas para su crecimiento y correcto desempeño en la reducción de los contaminantes. Si existe poca disponibilidad de nutrientes en el medio se puede limitar la degradación microbiana de los hidrocarburos y por tanto es necesario ajustar la proporción C:N: P, mediante la adición de algún tipo de fertilizante que permita estimular el

proceso de degradación, si existe una adecuada disponibilidad de nutrientes, el crecimiento de las raíces de las plantas permitirá un mayor contacto entre las comunidades microbianas de la rizósfera y la concentración del hidrocarburo, acelerando la degradación del compuesto (Kirkpatrick et al. 2006).

Las dos formas más asimilables son el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), por lo tanto, en aguas ricas en nitratos, este puede ser la fuente principal de nitrógeno (Jones et al. 2004). El ion amonio en los humedales puede ser tomado por las plantas mediante su zona radicular o por los microorganismos anaerobios convirtiéndolos nuevamente en materia orgánica (Mitsch y Gosselink 1986).

La degradación de hidrocarburos y la transformación del nitrógeno en la fitoremediación, comprende diferentes procesos microbianos que dependen de las condiciones aerobias y anaerobias del matriz suelo, los cuales puedan aumentar o disminuir la disponibilidad de los nutrientes para las plantas (Cubillos 2011).

#### **1.2.11 Plantas macrófitas**

Las plantas conocidas como Macrófitas o macrófitos son aquellas que pueden vivir en terrenos inundados de forma permanente o durante largos períodos de tiempo en condiciones de encharcamiento. También se conocen como plantas palustres y su porte alcanza cierta importancia, ya que se pueden encontrar especies entre los (30 - 120 cm.) en los juncos, (60-130 cm) en los esparganios, (120-240 cm) en las Typhas y en los carrizos (160-320 cm) (Valero 2006).

Muchas macrófitas acuáticas presentan tasas altas de crecimiento y de reproducción, lo cual favorece su capacidad de absorber sustancias disueltas en el agua y transformarlas en biomasa, con un consecuente efecto depurador del agua donde crecen. Esto ha conducido a evaluar su capacidad depuradora y la posibilidad de utilizarlas como parte de tratamiento de aguas residuales (Valderrama 1996).

Teniendo en cuenta su morfología y fisiología, las macrófitas pueden clasificarse según la forma de fijación en:

**a) Macrófitas fijas al sustrato**

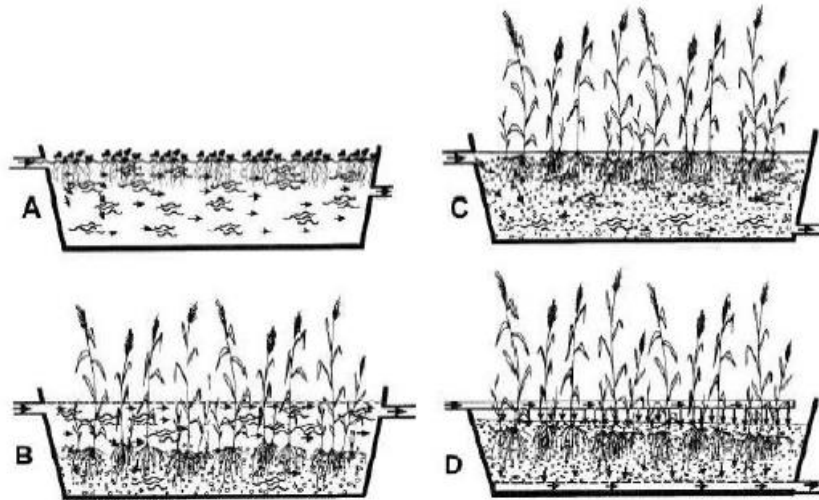
Macrófitas emergentes: en suelos anegados permanentes o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos.

Macrófitas de hojas flotantes: principalmente angiospermas; sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos.

Macrófitas sumergidas: comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

**b). Macrófitas flotantes libres:** Presentan formas muy diversas desde plantas de gran tamaño con roseta de hojas aéreas y/o flotantes y con raíces sumergidas bien desarrolladas a pequeñas plantas que flotan en la superficie, con muy pocas raíces o ninguna. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos pero muy ocasionalmente están sumergidos (Valero 2006).

A través de la estructura de las macrófitas usada en los humedales flotantes, así como



**Figura 1.** Clasificación de los humedales con plantas macrófitas

Tomada de: Stottmeister et al. 2003.

En la figura 1, se observa: A, laguna con plantas flotantes; B, Humedal de flujo horizontal superficial con plantas emergentes; C, humedal de flujo horizontal subsuperficial con plantas emergentes; D, humedal de flujo vertical con plantas emergentes.

### **1.2.12 *Typha latifolia***

La especie vegetal *Typha latifolia*, también conocida como espadaña o enea, pertenece a la familia de las Typhaceae, son plantas herbáceas perennes rizomatosas (con tallo subterráneo de varias yemas, que crece de manera horizontal emitiendo raíces y nuevos brotes), con largas hojas verdes y flores de

forma de salchicha en su parte apical. En su estado adulto alcanzan alturas entre 3.5–4.0 m (Tejeda 2010).

Las plantas de *Typha* siempre se encuentran en o cerca del agua, en pantanos, pozos y lagos. Son plantas indicadoras por excelencia de la salud de los humedales. Pueden tolerar inundaciones estacionales, pobres condiciones de suelo y salinidad moderada. Con grandes afluentes de nutrientes o aguas naturales, las espadañas son invasoras agresivas (USDA-NRCS 2006). Su distribución en el mundo va desde las zonas boreales hasta las zonas tropicales. La planta puede producir de cientos a miles de semillas que son eficientemente dispersadas y germinan en suelos escasamente húmedos o en aguas muy superficiales (Lara 1999).

### **1.3 MARCO LEGAL**

En Colombia se vela por la preservación del medio ambiente, en la constitución de 1991 en sus artículos 7, 8, 49, 67, 79, 80, 81.82, 95, 215 se establece el medio ambiente como derecho colectivo, fundamental y derecho rector del estado. Con la ley 99 de 1993 se crea el Ministerio de ambiente, estableciendo normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar, y mejorar las condiciones sanitarias y se organiza el sistema nacional ambiente (SINA).

La existencia de la política que regula las estaciones de servicio, no implica su reglamentación, por lo tanto, el Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, elaboró las Guías Ambientales para el sector de hidrocarburos y a

través de la resolución 1023 del 28 de julio de 2005, resuelve adoptarla como instrumento de autogestión y autorregulación y como consulta y referencia de carácter conceptual y metodológico tanto para los usuarios como para las autoridades ambientales (MAVDT 2005).

La normativa de manejo de residuos de hidrocarburos en Colombia se encuentra regulada por las siguientes normas.

### **1.3.1 Decreto 3930 de 2010**

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

En el artículo 35 se establece la obligatoriedad por parte de los usuarios que exploren, exploten, manufacturen, refinan, transformen, procesen, transporten o almacenen hidrocarburos o sustancias nocivas para la salud y para los recursos microbiológicos, de elaborar e implementar los Planes de Contingencia los cuales tienen como objeto establecer los lineamientos para el manejo, almacenamiento y gestión integral de los residuos peligrosos, incluyendo la construcción de estructuras para el manejo y control de derrames, así como las medidas de remediación en caso de que la contingencia ocurra.

En el año 2005 fue aprobada por el Consejo Nacional Ambiental, la Política Ambiental para la Gestión Integral de los Residuos o Desechos Peligrosos, y se definen como “todo residuo que, por su naturaleza, cantidad generada,



condiciones de entorno y/u otras, presente un potencial riesgo a la salud humana y/o a la preservación del medio ambiente.

La existencia de la política que regula las estaciones de servicio, no implican su reglamentación, por lo tanto, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, elaboro las Guías Ambientales para todos los sectores incluidos Hidrocarburos, y a través de la Resolución 1023 del 28 de julio de 2005, resuelve adoptarlas como instrumento de autogestión y autorregulación del sector y como consulta y referencia de carácter conceptual y metodológico tanto para los usuarios como para las Autoridades Ambientales (MAVDT 2005).

#### **1.3.2 Decreto 4741 de 2005**

Para el tratamiento de las aguas borras, señala que se debe encontrar dentro de las prioridades fundamentales de la industria petrolera, minimizar los impactos ambientales en el proceso de recolección y disposición final de las borras de petróleo, problemática que incluye cambios paisajísticos, olores ofensivos, emisión de residuos peligrosos, gaseosos, líquidos y sólidos, riesgos y enfermedades profesionales, entre otros.

#### **1.3.3 Decreto 1521 de 1998**

Por el cual se reglamenta el almacenamiento, manejo, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, para estaciones de servicio.

#### **1.3.4 Decreto 321 de 1999**

Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas.

#### **1.3.5 Resolución 1170 de 1997**

Por medio de la cual se dictan normas sobre estaciones de servicio e instalaciones afines.

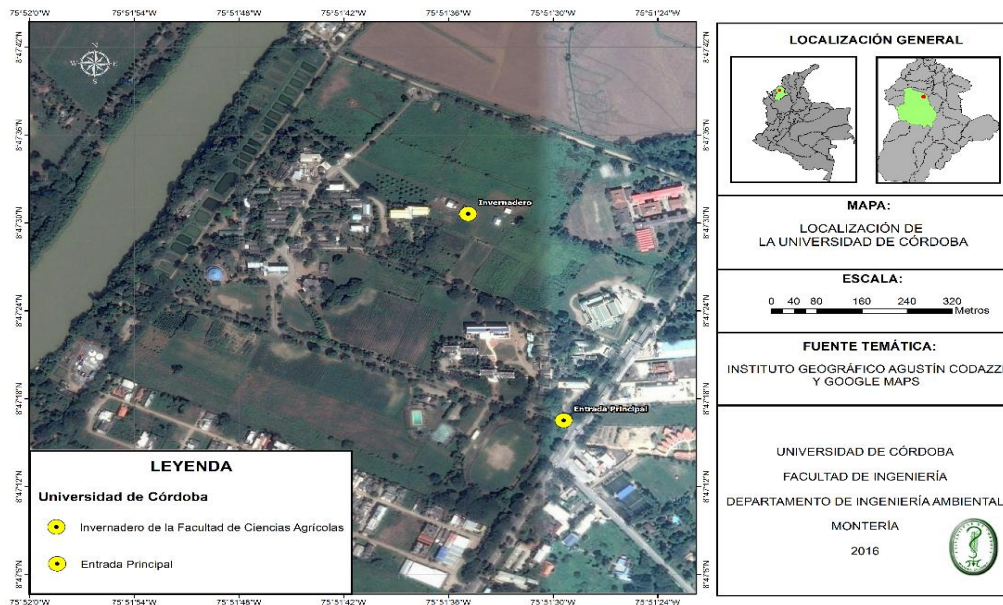
#### **1.3.6 Ley 1252 de 2008**

Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se llevó a cabo en la Sede central de la Universidad de Córdoba, ubicada en la Carrera 6 No. 76-103, en Montería - Córdoba, Colombia, específicamente en las instalaciones del laboratorio de compostaje de la facultad de Ciencias Agrícolas, situada geográficamente en las coordenadas (N: 8° 47'30,6"; W: 75° 51'34,86").



**Figura 2.** Localización del invernadero en la facultad de Ciencias Agrícolas

Tomada de: Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Google maps, 2017.

### **2.1.1 Recolección de muestra**

Las muestras de agua borra para este estudio fueron suministradas por la estación de servicio ALQUILER Y SUMINISTRO DE COLOMBIA S.A.S. ubicada en el municipio de Cerete – Córdoba. Las muestras fueron tomadas de la zona superficial de los tanques de almacenamiento de agua borra de gasolina, con el fin de obtener una muestra reciente, estas se presentaban en forma líquida con una pequeña capa de sólidos sedimentados en la parte inferior de la botella de vidrio, esterilizadas con tapa rosca y respectivamente rotuladas.

## **2.2 HUMEDALES ARTIFICIALES**

### **2.2.1 Montaje**

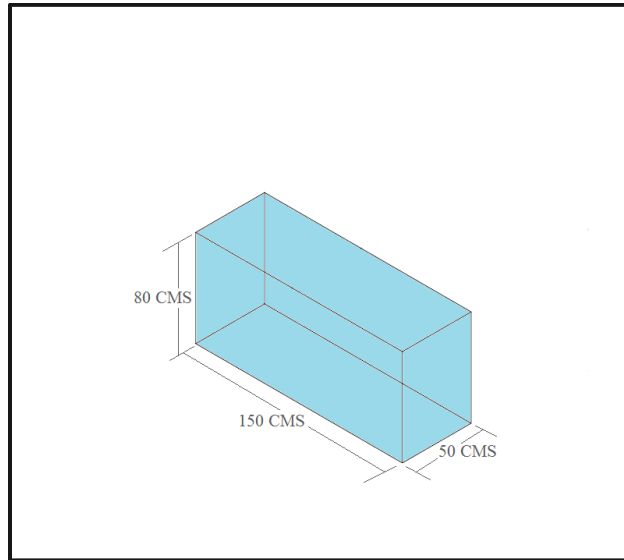
La planta piloto constó de cuatro (4) humedales horizontales de flujo subsuperficial, contruidos en fibra de vidrio, los cuales presentan las siguientes dimensiones 150 x50 x 80 cm (Largo –Ancho- Alto) con una relación 1: 3 y sus respectivas salidas.

Se utilizó como medio de soporte grava con un diámetro efectivo entre 0,0127 m y 0,0381 m. (Velasco y Espinosa 2010).

Para valoró el efecto de la aplicación de nutrientes en la biodegradación de hidrocarburos, se adicionó NPK a dos (2) humedales, uno plantado y uno sin plantar como control.

En los humedales la alimentación de las aguas se realizó tipo cochada o lotes donde el drenado del agua actúa como una bomba de aire pasiva que contribuye

a la aireación de la superficie del humedal (Wallace y Knight 2006; Navarro et al. 2008).



**Figura 3.** Esquema del humedal artificial

### **2.2.2 Selección de los medios**

Se utilizó como medio soporte grava tres tipos diferentes de granulometría (grava gruesa de 0,0381 m, grava media 0,0258 m de y grava fina de 0,0127 m; con profundidades de 21 cm, 21 cm y 28 cm respectivamente. La grava fue depositada según su granulometría de manera descendente.

Se calculó el porcentaje de porosidad del sustrato para conocer el volumen necesario de agua adicionado al humedal obteniendo un valor de fue 207, 375 L (Anexo 1), posteriormente se adicionó el 3% (6,22 L) de este valor en agua borra

considerado como óptimo para el proceso de remoción de este contaminante. (Anexo 2).

### **2.2.3 Selección de la especie vegetal**

Después de instalarse el montaje de los humedales artificiales, se procedió a realizar la recolección y posterior siembra de la especie vegetal. La planta que se sembró en los dos (2) humedales es la *Typha latifolia* (una planta macrófita de zonas húmedas que ha demostrado ser tolerante a los hidrocarburos) (Frick et al .1999; Pulgarin 2012). Al ser una especie nativa del municipio de Montería – Córdoba, se tomaron de diferentes puntos de la ciudad, teniendo en cuenta que la planta estuviera en condiciones adecuadas para un trasplante. La adaptación y estabilización de la especie vegetal fue de dos (2) semanas antes de la realización de análisis.



**Figura 4.** Recolección de la especie vegetal *Typha latifolia*.

#### 2.2.4 Selección de nutriente.

El nutriente que se empleó en los dos (2) humedales (uno con especie vegetal y uno sin ella), es NPK conocido de manera comercial como 15-15-15, este ha demostrado ser eficiente en la remoción de hidrocarburos, en proporciones de  $C=100$ ,  $N=1$ ,  $P=0,1$  y  $K=0,01$ , teniendo en cuenta estudios realizados anteriormente. (Acuña et al. 2012; Salazar 2015). Durante los dos (2) primeros muestreos se adicionaron 500 g y 1 kg de nutriente respectivamente, con el fin de comparar la eficiencia de remoción al ser agregado este fertilizante.



**Figura 5.** Nutriente NPK 15-15-15

### 2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS EN LAS UNIDADES EXPERIMENTALES.

Para la determinación de la concentración de los diferentes parámetros involucrados en el tratamiento de agua borra se realizó una fase de muestreo, esta se llevó a cabo en un periodo de dos meses y medio (2,5). Se realizaron cuatro

(4) muestreos y se tomó una muestra inicial como punto de referencia para comparar con los posteriores muestreos, los dos (2) primeros muestreos se realizaron cada quince (15) días, los dos (2) siguientes se llevaron a cabo cada veintiocho (28) días.

En cada jornada de muestreo se realizaron análisis de Temperatura (°C), pH, [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] ppm, [NH<sub>3</sub><sup>+</sup>] ppm, [PO<sub>4</sub><sup>-</sup>] ppm y [TPH] ppm, en cada humedal artificial. Las muestras fueron recolectadas y analizadas en los laboratorios de Agua y Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba con base en los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales establecidos por American Public Health Association (APHA 2005).

Para determinar TPH (hidrocarburos totales de petróleo), se utilizó el método de espectroscopia de UV mediante un espectrofotómetro UV-VIS, con su respectiva estandarización en base a estudios anteriores (Grijalva 2003; Arango y Pérez 2012; Salazar 2015).

Para el análisis del porcentaje de remoción de TPH de cada unidad experimental se utilizó la siguiente ecuación (Ñustez 2012).

$$\%Remocion = \frac{[ ] Inicial - [ ] Salida}{[ ] Inicial} \times 100\% \quad (1)$$

## **2.4 CALCULO DE LA TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO DE LA ESPECIE VEGETAL (TRC).**

A partir del establecimiento de las plantas en los humedales, se extrajeron de cada



muestreo realizado, muestras de plantas correspondientes a cada tratamiento, para determinar el peso seco de la planta.

Para calcular el peso seco, se procedió a calcificar la muestra en un horno a 105 °C durante una (1) hora aproximadamente; el residuo de este proceso fue pesado en una balanza analítica. Con los datos obtenidos en el laboratorio se procedió al cálculo del índice de crecimiento relativo.

**2.4.1 Tasa relativa de crecimiento (TRC):** Permite medir la eficiencia de la planta en el incremento de peso por unidad de tiempo (Hunt 1990).

$$TRC = [Ln W_2 - Ln W_1 / (T_2 - T_1)] \quad (1)$$

Donde:

T<sub>1</sub>: Tiempo inicial

T<sub>2</sub>: Tiempo final

W<sub>1</sub>: Peso seco de la planta en T<sub>1</sub>

W<sub>2</sub>: Peso seco de la planta en T<sub>2</sub>

## 2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

En la investigación se tuvieron en cuenta dos factores: Plantas (con plantas y sin plantas) y nutrientes (con nutrientes y sin nutrientes) para un total de cuatro (4) tratamientos.

En la tabla 1, se presentan los factores de estudio, los niveles y el número de tratamientos propuestos.

**Tabla 1.** Factores, Niveles y tratamientos.

Factores	Niveles	Nº de niveles	Nº de Tratamientos
Planta	Con planta	2	4
	Sin planta		
Nutrientes	Con nutriente	2	
	Sin nutriente		

Los 4 tratamientos obtenidos en los humedales artificiales son: CPCN (con planta y con nutriente); CPSN (con planta y sin nutriente); SPCN (sin planta y con nutriente); SPSN (sin planta y sin nutriente).



**Figura 6.** Sistema de humedales artificiales.

## **2.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Para desarrollar el análisis de varianza se utilizó el software R. Versión 12.

Aplicando una ANOVA para cada factor. Para todos los análisis estadísticos el nivel de significancia se establecerá en  $p$  menor o igual que 0.05 ( $p < 0.05$ ).

Además, se realizaron pruebas de normalidad y homogeneidad de las variables para verificar el comportamiento de los tratamientos durante las diferentes fases de nuestros (Anexo 7).

Por otra parte, se realizó una matriz de correlación con el objetivo de medir y analizar la interdependencia en relaciones asociadas o entre cada pareja de variables seleccionadas y todas al mismo tiempo.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA BORRAS.**

Durante el tiempo de muestreo, se analizó la variación de las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos como: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH,  $[\text{NO}_3^-]$  ppm,  $[\text{NH}_3^+]$  ppm y  $[\text{TPH}]$  ppm,  $[\text{PO}_4^-]$  ppm; para determinar la calidad de agua al iniciar y al terminar el tratamiento.

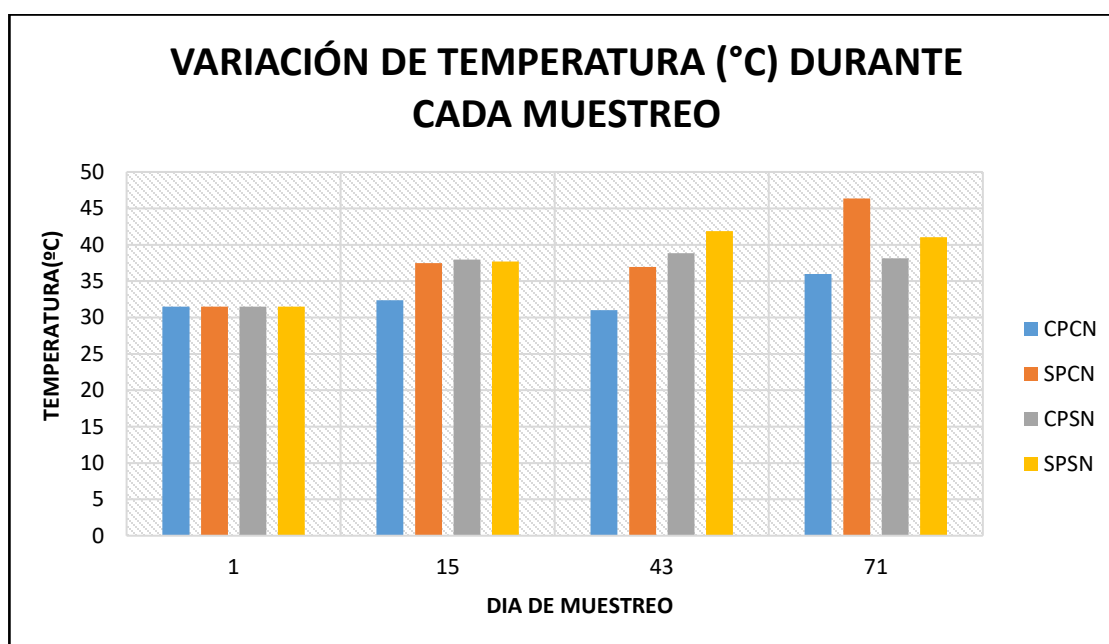
##### **3.1.1 Temperatura( $^{\circ}\text{C}$ )**

La actividad enzimática depende de la temperatura, así mismo esta influye en los cambios estructurales y químicos del petróleo. A bajas temperaturas, la viscosidad de los compuestos de hidrocarburo incrementa y sus componentes tóxicos de bajo peso se reducen, retrasando el proceso de biodegradación (Ñustez 2012).

Para el análisis de este parámetro se tomaron diferentes valores temperatura durante el tiempo de muestreo, estos se ponderaron, obteniendo valores que oscilan entre  $31,5^{\circ}\text{C} - 46,36^{\circ}\text{C}$  con un valor medio de  $37,12^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 2.** Variación de la temperatura (°C) en cada muestreo.

Día de muestreo	Tipo de muestra	T (°C)
1	Borra diluida	31,5
15	CPCN	32,35
	SPCN	37,46
	CPSN	37,96
	SPSN	37,68
43	CPCN	31,02
	SPCN	36,93
	CPSN	38,85
	SPSN	41,86
71	CPCN	35,98
	SPCN	46,36
	CPSN	38,12
	SPSN	41,03



**Gráfica 1.** Variación de la temperatura (°C) durante cada muestreo.

En la gráfica 1, se puede observar una variación de la temperatura en cada una de las muestras tomadas, esto se pudo presentar por las condiciones ambientales

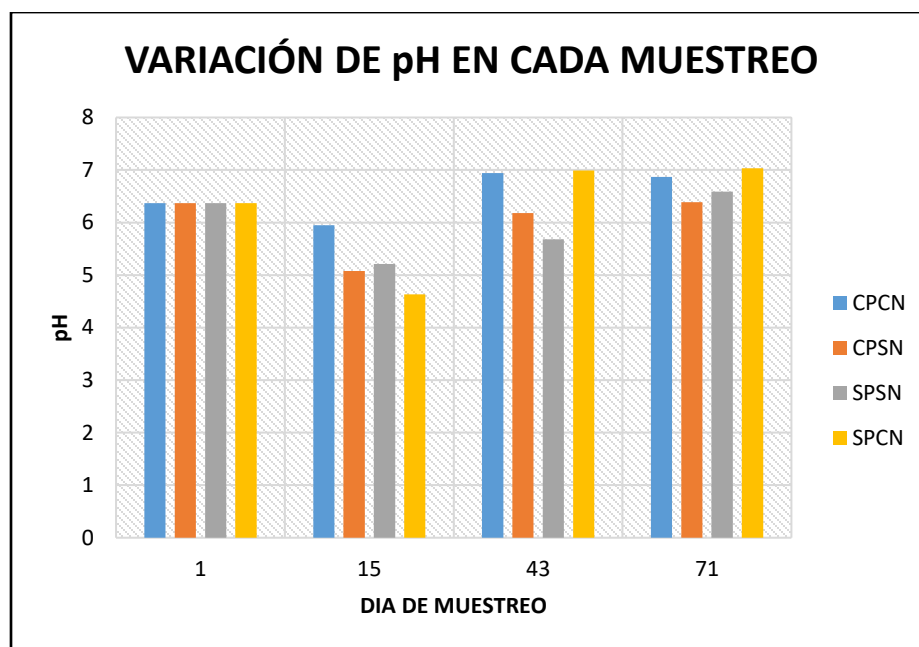
del lugar debido a una alta exposición a la radiación solar en los humedales artificiales.

### 3.1.2 pH

Este parámetro es considerado importante por su influencia en la efectividad de los procesos de bioremediación, considerando como óptimo el intervalo entre 6 – 8. Los valores de pH inferiores a seis (6) unidades (ácidos) inhiben el crecimiento de la gran mayoría de los grupos microbianos, lo mismo pasa con valores mayores a ocho (8) unidades (alcalinos) (Ñustez 2012).

**Tabla 3.** Variación del pH durante cada muestreo.

<b>Día de muestreo</b>	<b>Tipo de muestra</b>	<b>Ph</b>
1	Borra diluida	6,37
15	CPCN	5,95
	CPSN	5,08
	SPSN	5,21
	SPCN	4,63
43	CPCN	6,94
	CPSN	6,18
	SPSN	5,68
	SPCN	6,99
71	CPCN	6,87
	CPSN	6,39
	SPSN	6,59
	SPCN	7,03



**Gráfica 2.** Variación del pH durante cada muestreo.

Se puede observar en la gráfica 2, un aumento significativo del pH en los cuatro (4) humedales, alcanzando valores que entran dentro del rango considerado como óptimo para la eficiencia del tratamiento. Durante la fase de muestreo el pH se mantuvo en un intervalo de 5- 7, se presentó un aumento con respecto al tiempo, esto se atribuye a la remoción del contaminante. Factores como las plantas y el nutriente afectaron de manera poco significativa esta variable considerándose entonces como una variable independiente de ellos.

### 3.1.3 $\text{NH}_3^+$

Una de las dos (2) formas de nitrógeno más asimilable por las plantas es el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3^+$ ) (Cubillos 2011); este influye de manera directa en la supervivencia y crecimiento de la planta. Se analizó este parámetro en las dos (2) unidades experimentales que cuentan con la adición de nutriente; en la

muestra cero (0) y los humedales que no contaron con la adición de nutriente presentaron un  $< LC$  (1), que se interpreta como la presencia casi nula de este compuesto, esto indica que el nutriente es la variable que aporta  $NH_3^+$ .

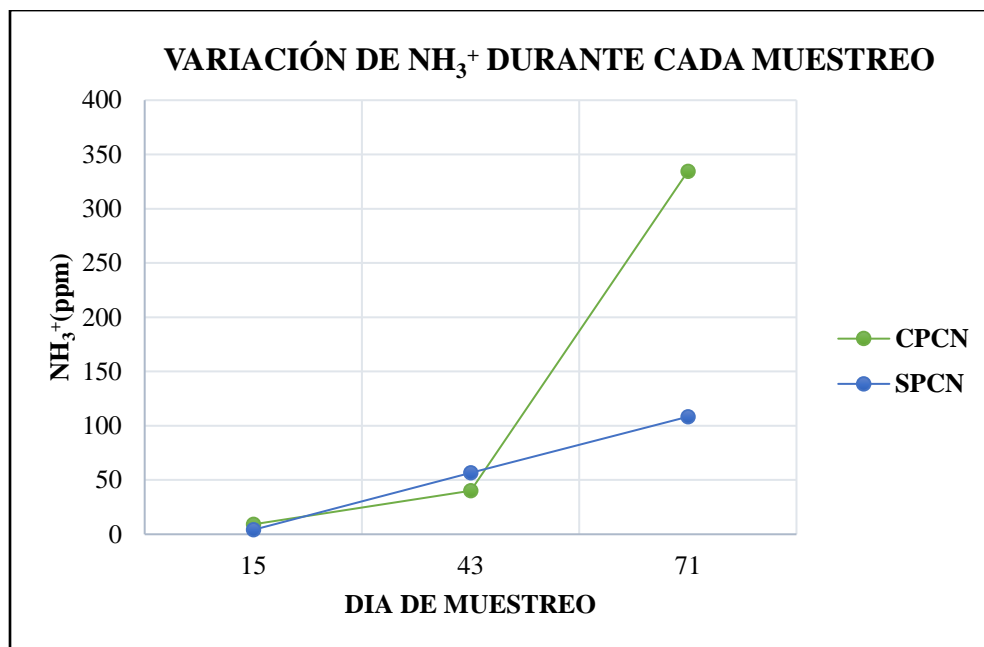
**Tabla 4.** Variación de  $NH_3^+$  durante cada muestreo.

<b>Día de muestreo</b>	<b>Tipo de muestra</b>	<b>[<math>NH_3^+</math>] ppm</b>
1	Borra diluida	$< LC$ (1)
15	CPCN	9,18
	CPSN	$< LC$ (1)
	SPSN	$< LC$ (1)
	SPCN	4,09
43	CPCN	40,26
	CPSN	$< LC$ (1)
	SPSN	$< LC$ (1)
	SPCN	56,62
71	CPCN	334,38
	CPSN	$< LC$ (1)
	SPSN	$< LC$ (1)
	SPCN	108,3

**Tabla 5.** Variación de  $NH_3^+$  en las unidades experimentales que contaron con la adición de nutriente durante cada muestreo.

<b>Día de muestreo</b>	<b>Tipo de muestra</b>	<b>[<math>NH_3^+</math>] ppm</b>
15	CPCN	9,18
	SPCN	4,09
43	CPCN	40,26
	SPCN	56,62
71	CPCN	334,38
	SPCN	108,3





**Gráfica 3.** Variación de  $\text{NH}_3^+$  en las unidades experimentales que contaron con la adición de nutrientes durante cada muestreo.

Durante el segundo muestreo se puede observar un leve aumento de los niveles de  $\text{NH}_3^+$  dentro las unidades experimentales, esto puede atribuirse a un proceso de nitrificación que es la transformación de este compuesto a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). En el humedal CPSN los niveles son un poco más bajos que en los humedales SPCN, esto se debe a la misma presencia de estas plantas que utilizan este tipo de nitrógeno para su desarrollo.

En el tercer muestreo los niveles de nitrógeno amoniacal en el humedal CPCN sufren un aumento significativo que pudo ser causado por dificultad de efectuarse el proceso de nitrificación debido a la presencia de materia orgánica y variación de temperatura (Cubillo 2012). En el humedal SPCN el aumento es poco significativo con respecto a CPSN esto se debe que el proceso de nitrificación no

presenta tanta dificultad para presentarse al no contar con la presencia de plantas que generan materia orgánica.

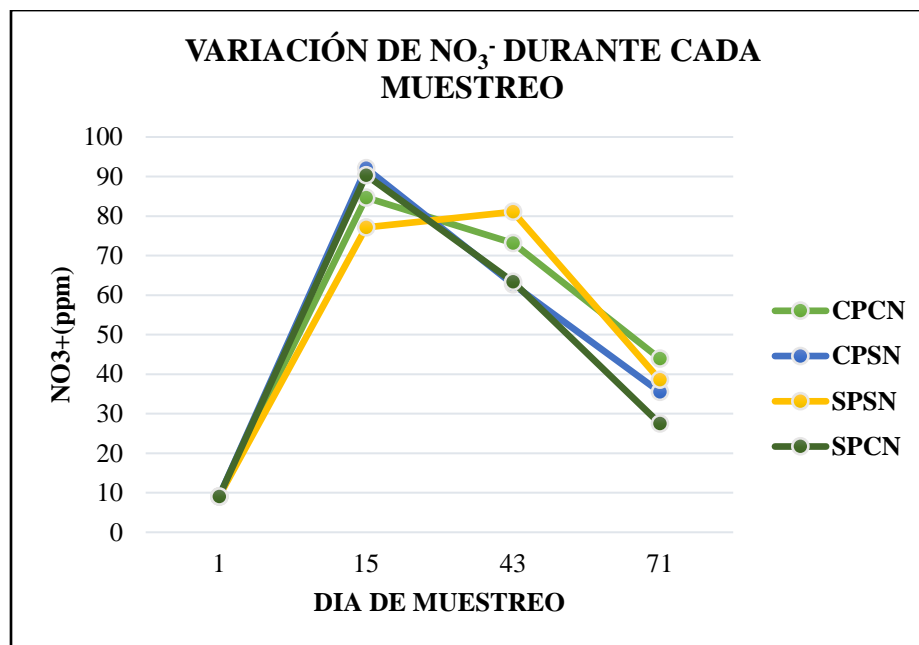
### 3.1.4 $\text{NO}_3^-$

Una de las dos (2) formas de nitrógeno más asimilable por las plantas es el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), este influye directamente en la supervivencia y crecimiento de la planta (Cubillos 2011).

Del estudio realizado los valores de nitrato arrojaron los siguientes resultados:

**Tabla 6.** Variación de  $\text{NO}_3^-$  durante cada muestreo.

<b>Día de muestreo</b>	<b>Tipo de muestra</b>	<b>[<math>\text{NO}_3^-</math>] ppm</b>
1	Borra diluida	9,09
15	CPCN	84,68
	CPSN	92,07
	SPSN	77,14
	SPCN	90,36
43	CPCN	73,17
	CPSN	62,75
	SPSN	81,07
	SPCN	63,33
71	CPCN	43,9
	CPSN	35,55
	SPSN	38,57
	SPCN	27,48



**Gráfica 4.** Variación de  $\text{NO}_3^-$  en las unidades experimentales que contaron con la adición de nutrientes durante cada muestreo.

En la gráfica 4, se observa que los valores de  $\text{NO}_3^-$  en la muestra cero (0) fueron bajos, en la muestra uno (1) hay un aumento significativo, esto puede deberse a que microorganismos se encargaron de degradar moléculas más complejas de nitrógeno encontradas en estas aguas contaminadas. A partir del primer muestreo se observa un comportamiento decreciente de los niveles de  $\text{NO}_3^-$ , a excepción del segundo muestro en el humedal SPSN que muestra un valor considerado como casi constante, este aumento poco significativo es interpretado como un valor atípico, el comportamiento de esta variable pudo ser alterado por las condiciones en que se encontraba el humedal en ese momento, ocasionando que se diera en mayor cantidad el proceso de nitrificación.

La disminución de  $\text{NO}_3^-$  pudo ser ocasionada principalmente por actividad microbiana en las unidades experimentales, actuando como agentes degradadores de este compuesto inorgánico. Otro factor a considerar es el aumento de  $\text{NH}_3^+$  que es considerado un índice para evaluar el comportamiento de este compuesto, esto se debe a que el  $\text{NH}_3^+$  actúa como agente productor de  $\text{NO}_3^-$  en un proceso conocido como nitrificación. Una disminución de  $\text{NO}_3^-$  se interpreta como una baja ejecución en el proceso de nitrificación.

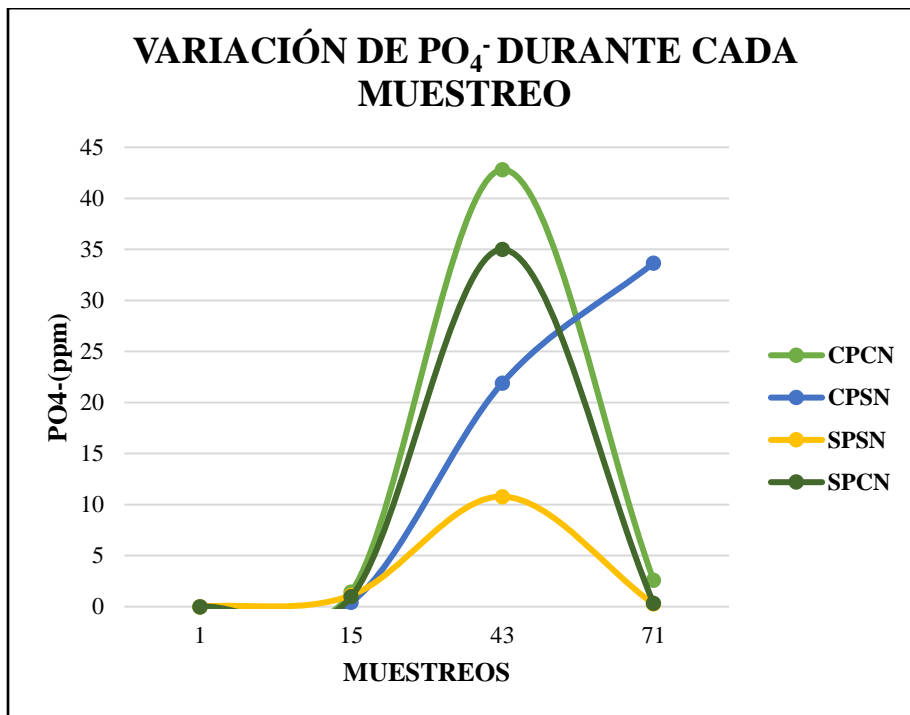
### 3.1.5 $\text{PO}_4^-$

El fósforo es considerado un macronutriente de vital importancia para el desarrollo de microorganismos y plantas, este parámetro influye de manera directa en estas variables (Lara 199). Durante los muestreos se observa una alta fluctuación de estos valores como se muestra a continuación.

**Tabla 7.** Variación de  $\text{PO}_4^-$  durante cada muestreo.

Día de muestreo	Tipo de muestra	$[\text{PO}_4^-]$ ppm
1	Borra diluida	0,19
15	CPCN	1,42
	CPSN	0,42
	SPSN	1,11
	SPCN	0,98
43	CPCN	42,81
	CPSN	21,92
	SPSN	10,78
	SPCN	35
71	CPCN	2,59
	CPSN	33,66
	SPSN	0,26
	SPCN	0,32

Con los resultados obtenidos se realizó una gráfica para un análisis más profundo del comportamiento de esta variable en los cuatro (4) humedales, se obtuvo en casi todos un comportamiento considerado como parabólico como lo muestra la gráfica 5, a excepción de la unidad experimental CPSN que muestra un crecimiento continuo, considerándose como un valor atípico. El comportamiento de este parámetro durante toda la fase de muestreo pudo verse afectado por las condiciones del medio, se presentó una alta fluctuación de variables consideradas como dependientes para este compuesto como son el pH, temperatura.



**Gráfica 5.** Variación de  $\text{PO}_4^-$  en las unidades experimentales que contaron con la adición de nutrientes durante cada muestreo.

En la gráfica 5, se observa que el muestreo cero (0) arrojó valores casi nulos de fosfatos, la primera muestra arrojó valores de fosfato bajos en las cuatro (4)

unidades experimentales, la segunda muestra presento un aumento muy significativo de este macronutriente, se asume que en estas aguas contaminadas se encontraban compuestos mucho más complejos de fosforo, los microorganismos actuaron como agentes degradadores de dichos compuestos, dejando las partículas de fosforo en un estado más simple como lo es el fosfato como ortofosfatos que fue el parámetro medido. Las mayores concentraciones se presentaron en los dos (2) humedales que contaron con la adición del fertilizante, este aportó de manera directa  $\text{PO}_4^-$ .

En el tercer muestreo nuevamente se presentaron valores bajos de ortofosfato, con excepción del humedal CPSN, se pudo presentar aumento de este macronutriente por la alta tasa de muerte de las plantas, este aporte de material vegetal en descomposición pudo liberar cantidades significativas de varios compuestos como el fosfato. En las unidades experimentales restantes se presentó una baja muy significativa de este macronutriente, a pesar de la adición de nutrientes realizada en el segundo muestreo para los humedales seleccionados, se observa que los niveles presentan el mismo comportamiento que el humedal SPSN; esto se atribuye a los microorganismos presentes en los humedales que poseen un alto nivel de degradación de este compuesto usándolos como fuente energética para su proliferación.

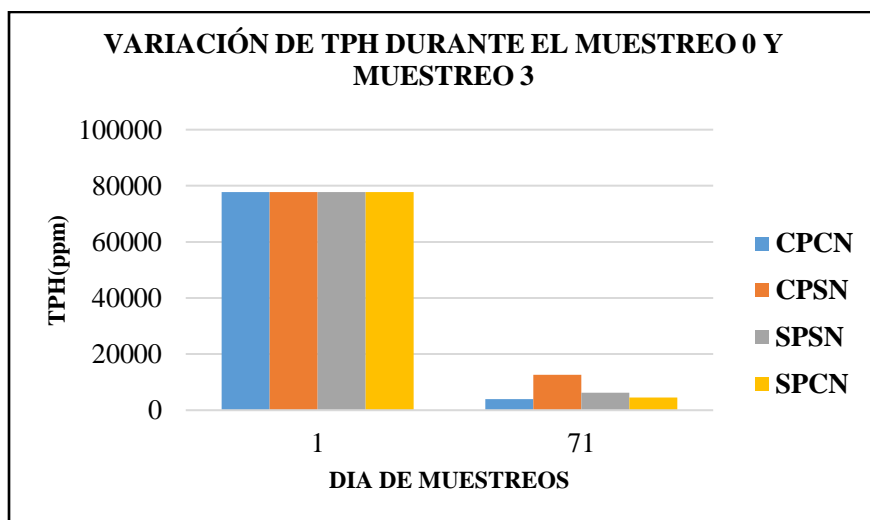
### **3.1.6 TPH**

Este estudio fue realizado para conocer la eficiencia de remoción de cuatro (4) humedales artificiales, contaminados con agua borra diluida al 3%. Algunos de estos se encuentran influenciados por factores como la adición de nutrientes y la

especie vegetal seleccionada, se obtuvo cuatro (4) combinaciones diferentes. En la tabla 8, se observan los resultados obtenidos durante los muestreos para la variable TPH.

**Tabla 8.** Variación de TPH durante cada muestreo.

Día de muestreo	Tipo de muestra	[TPH] ppm
1	Borra diluida	77720,56
15	CPCN	220697,21
	CPSN	18608,88
	SPSN	8949,44
	SPCN	51879,26
43	CPCN	3382,17
	CPSN	45615,57
	SPSN	67746,04
	SPCN	256,39
71	CPCN	3938,31
	CPSN	12612,92
	SPSN	6237,84
	SPCN	4538,37



**Gráfica 6.** Variación de TPH durante la fase de muestreo.

En la gráfica 6, se observa un decrecimiento muy significativo, esto se interpreta como una alta remoción del contaminante durante toda la fase experimental.

Otra diferencia considerable, es la presencia de una membrana gruesa en la superficie de las aguas de los humedales que no contaron con la adición nutrientes. En los humedales que contaron con la presencia de nutrientes, se considera que la actividad microbiana es mayor, mejorando las condiciones físicas del agua de manera más significativa, evitando la formación de esta membrana.



**Figura 7.** Diferencia presentada en el agua en los humedales con nutriente y sin nutriente.

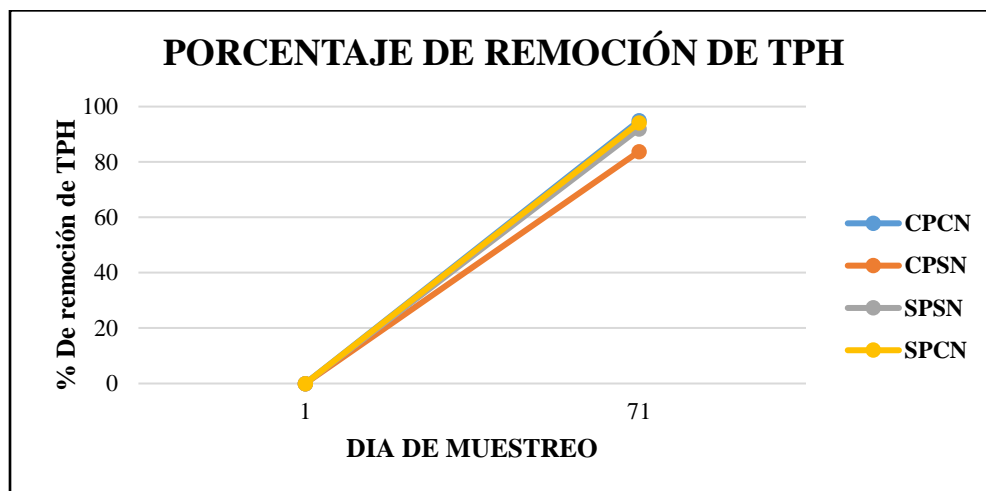
Se obtuvo un alto porcentaje de remoción de TPH como lo muestra la siguiente tabla y gráfica.

**Tabla 9.** Porcentaje de remoción de TPH

<b>Día de muestreo</b>	<b>Tipo de muestra</b>	<b>% Remoción</b>
1	Borra diluida	0
	CPCN	94,9327308



71	CPSN	83,77144992
	SPSN	91,97401563
	SPCN	94,1606571



**Gráfica 7.** Porcentaje de remoción de TPH

En la gráfica 7, se observa un alto porcentaje de remoción, que supera el 90% en casi todas las unidades experimentales, valor que se considera efectivo en índices de remoción de hidrocarburos.

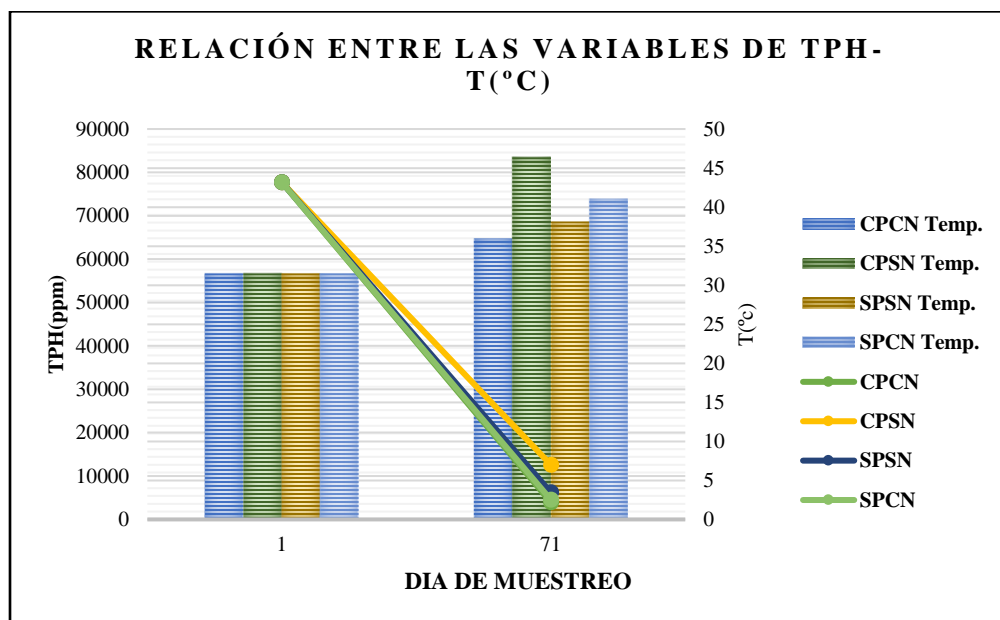
La unidad experimental que presentó mayor remoción de TPH fue CPCN, esto pudo deberse a que este humedal contaba con la presencia de plantas y la adición de nutrientes, la interacción de estos factores con el medio controlado, pudo elevar de manera poco significativa la remoción de TPH frente a las demás unidades experimentales.

Los humedales CPCN y SPCN presentaron remoción del 94% superando a los humedales que no contaban con la adición de nutriente, considerando este factor como relevante dentro del tratamiento.

De manera general la mayor parte del contaminante fue removido por la estratificación de sustrato que actúa como agente fijador de este compuesto. Otro factor a tomar en cuenta en este proceso de remoción de TPH es la alta actividad microbiana presente en las unidades experimentales.

### 3.1.6.1 Relación entre las variables TPH- T(°C).

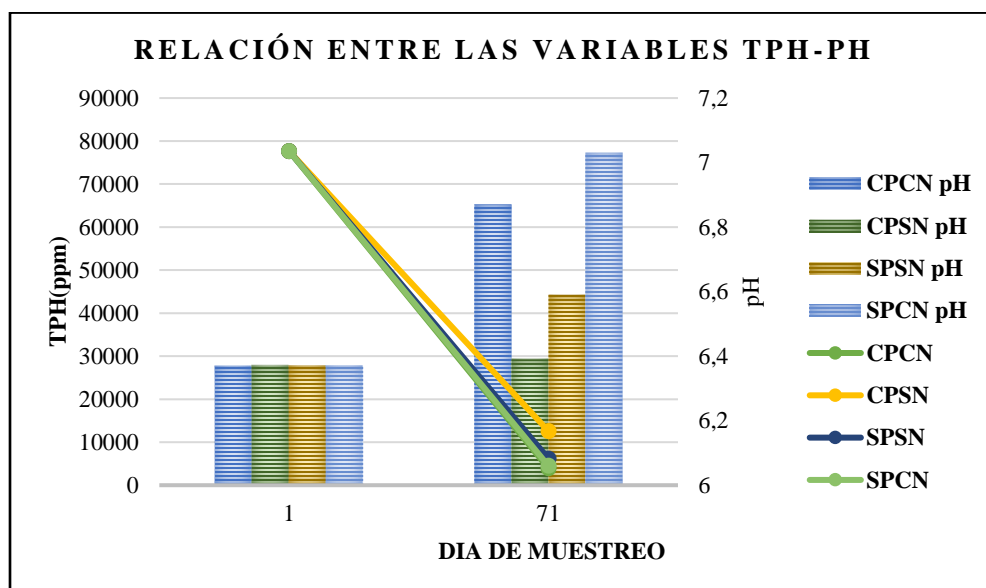
Durante la fase de muestreo la temperatura se mantuvo en un promedio de 31,5 °C – 46,36°C con un valor medio de 37,12 °C. Al elevarse la temperatura aumenta el movimiento de las partículas y la velocidad de la reacción dentro de las aguas contaminadas. En este intervalo de T(°C) se considera que no es un factor que figure como relevante de manera directa en el proceso de remoción de TPH, teniendo en cuenta que no se hizo un seguimiento continuo de esta variable.



**Gráfica 8.** Relación entre las variables de TPH-T(°C).

### 3.1.6.2 Relación entre las variables TPH- pH

Se analizó la relación de la variable TPH- pH, a medida que va aumentando el pH disminuyo el TPH en las aguas contaminadas. El pH es un factor que afecta la disponibilidad de nutriente y el crecimiento de las plantas, con el aumento de este se dio un impacto positivo para la actividad microbiana y absorción de nutrientes por parte de las plantas. Esto trae consigo una mayor absorción y degradación de TPH disminuyéndolo considerablemente.



**Gráfica 9.** Relacion entre las variables de TPH-pH

### 3.2 CACULO DE LA TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO (TRC).

La tasa relativa de crecimiento TRC, se refiere al crecimiento en biomasa seca a partir de un gramo de masa seca de la planta en un intervalo de tiempo, con relación a la inicial.

Los índices son mayores durante las fases vegetativas tempranas de las plantas y disminuyen conforme se alcanza la madurez y las hojas llegan a la senescencia (Martínez 2011).

Para el cálculo de las tasas de crecimiento se recolectó una planta de su medio natural, la cual no fue sometida a ningún proceso de contaminación para comparar la variación de su crecimiento con respecto a otras plantas en diferentes tiempos con estrés de contaminante. En cada muestreo se tomó una planta en dos (2) de las unidades experimentales ambas con plantas, una con nutrientes y una sin este, para su análisis y posterior comparación de sus tasas de crecimiento. Las plantas fueron llevadas al laboratorio de química de la Universidad de Córdoba, en este fueron sometidas a un proceso de secado y posterior pesado en una balanza analítica.

### **3.2.1 Comparación de la TRC de la planta sin estrés de contaminante vs planta contaminadas en cada muestreo.**

#### **3.2.1.1 Humedal plantado sin adición de nutriente (CPSN)**

**Tabla 10.** Calculo de tasa de crecimiento relativo de una planta sin estrés de contaminante vs plantas sin nutrientes expuestas a contaminante en cada muestreo.

<b>CPSN</b>		
<b>DDT</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>TRC (gg<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>)</b>
1	34,6437	
15	151,7976	0,105530869
43	80,102	0,029935176
71	26,8136	-0,009150238

En el primer resultado se pudo observar que la planta tomada durante el primer muestreo arrojó un valor positivo que representa crecimiento significativo respecto a la planta sin estrés de contaminante, esto se puede atribuir a la diferencia en la fisiología de las plantas en las muestras tomadas, a pesar del cambio de condiciones del medio.

En el segundo muestreo arrojó un crecimiento poco significativo respecto a la planta sin estrés de contaminante, esto pudo deberse al cambio en las condiciones del medio a las que estuvo expuesta la planta, con un déficit de nutrientes y cambios en el pH.

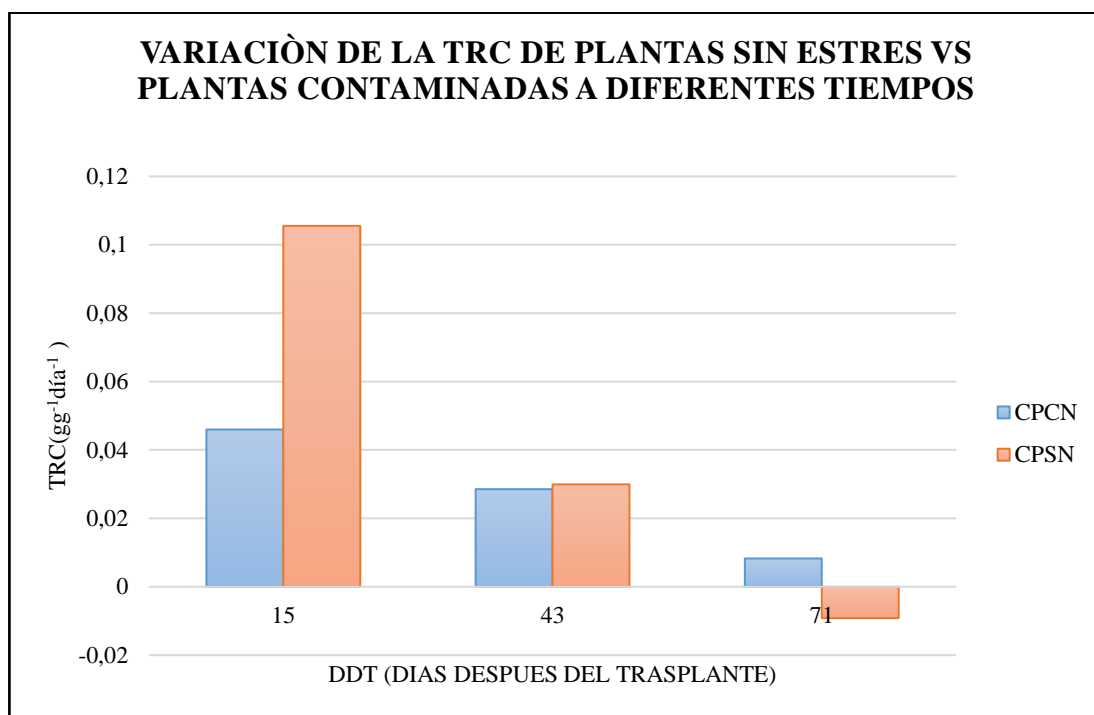
En el tercer muestreo se pudo observar un valor negativo que se puede interpretar como un decrecimiento que puede ser causado por un proceso de saturación de contaminante en la planta, generando un proceso de pérdida de cuerpo vegetal y su posterior muerte.

### 3.2.1.2. Humedal plantado con adición nutriente(CPCN)

**Tabla 11.** Calculo de tasa de crecimiento relativo de una planta sin estrés de contaminante vs plantas con nutrientes expuestas a contaminante en cada muestreo.

CPCN		
DDT	Peso seco (g)	TRC ( $\text{gg}^{-1}\text{día}^{-1}$ )
1	27,54	
15	52,4196	0,045974362
43	61,23	0,028535635
71	34,723	0,008277243

De los resultados obtenidos de los diferentes muestreos se puede analizar un crecimiento poco significativo de las plantas con respecto a la inicial, esto pudo ser causado por la alta disponibilidad de nutrientes, que generan una actividad enzimática, favorable para la planta, este crecimiento disminuye con respecto al tiempo, por el exceso de contaminante en el cuerpo de la planta.



**Gráfica 10.** Variación de la TRC de las plantas sin estrés en función a las plantas contaminadas a diferentes a diferentes tiempos.

La grafica 10. muestra una variación del crecimiento de las plantas en función a una planta sin estrés de contaminante. Durante los dos primeros muestreos, se observa una variación más significativa en las plantas sin nutrientes que en las plantas con nutrientes, esto puede ser ocasionado por la misma adición de fertilizantes, manteniendo una estabilidad en la tasa de crecimiento. En el último

muestreo se observa un decrecimiento en la planta sin nutriente que es ocasionado por un exceso de contaminante en la planta y déficit de nutrientes; en las plantas con nutrientes aún se presenta un leve crecimiento ocasionado por lo mencionado anteriormente.

### 3.2.2 COMPARACIÓN DE LA TRC CON RESPECTO AL TIEMPO

#### 3.2.2.1 Humedal plantado con nutrientes (CPCN).

**Tabla 12.** Calculo de tasa crecimiento relativo para las plantas de la unidad experimental con nutriente.

CPCN		
DDT	Peso seco(g)	TRC ( $\text{gg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )
1	54,291	
15	52,4196	-0,002505564
43	61,23	0,005548454
71	34,723	-0,020258392

Se pudo observar que el resultado de la primera muestra arrojó un valor negativo, que se interpreta como un decrecimiento en la planta, esto se puede atribuir a un cambio abrupto de sus condiciones, entre las que cabe resaltar el pH, temperatura, materia orgánica y disponibilidad de nutrientes, al pasar de su entorno natural a uno artificial controlado constituido por sustrato y agua borra.

El resultado de la segunda muestra arrojó un valor positivo, que evidencia un crecimiento de la planta, esto pudo deberse a la adicción de nutriente durante el primer muestreo, generando una disponibilidad nutriente, aumentando la actividad microbiana del humedal.

El resultado de la tercera muestra arrojó un decrecimiento, esto pudo estar relacionado con el largo periodo de exposición de las plantas a las aguas contaminadas con residuos líquidos de hidrocarburos, alcanzando su punto de saturación y posterior muerte.

### 3.2.2.2 Humedal plantado sin nutriente (CPSN)

**Tabla 13.** Calculo de tasa crecimiento relativo para las plantas de la unidad experimental sin nutriente

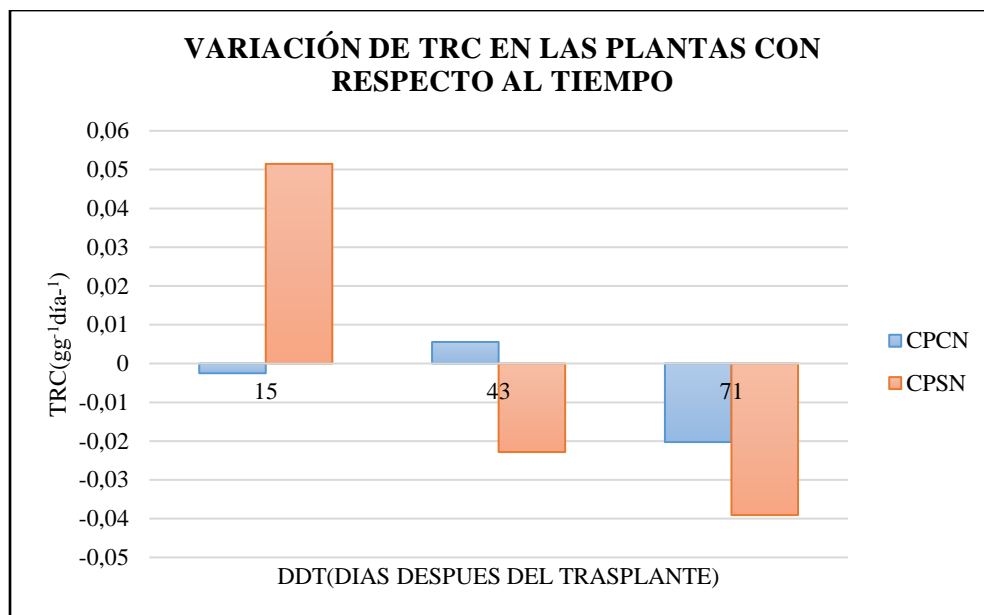
CPSN		
DDT	Peso seco(g)	TRC ( $\text{gg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )
1	73,842	
15	151,7976	0,051472884
43	80,102	-0,022830258
71	26,8136	-0,039085414

En el primer muestreo, se pudo observar que hubo un crecimiento de la planta, esto pudo deberse a su fisiología, que actúa como factor determinante en el crecimiento de la misma, a pesar del cambio de sus condiciones naturales a condiciones controladas, esta pudo crecer e incluso sobrevivir.

El segundo muestreo arrojó un resultado negativo que se considera como decrecimiento de la planta, esto pudo ser causado por las condiciones a las que estuvo expuesta la planta, con un déficit de nutrientes y cambios en el pH.

En el tercer muestreo se presentó un decrecimiento que puede ser atribuido a un exceso de contaminante y déficit de nutrientes en el cuerpo vegetal, que ocasiona una pérdida de su biomasa que conlleva a su posterior muerte.





**Gráfica 11.** Variación de TRC en las plantas con respecto al tiempo.

La grafica 11, compara las TRC para las plantas con y sin nutrientes, mostrando variaciones significativas en las plantas sin nutrientes, a diferencia de las plantas con nutrientes que muestran una variación menos significativa, atribuidas al fertilizante adicionado en los dos primeros muestreos.

### 3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL EFECTO DE LOS NUTRIENTES Y LA ESPECIE VEGETAL EN LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES.

Con el propósito de establecer el efecto que presentan las especies vegetales y nutrientes sobre la variable TPH, se realizó un diseño aleatorio, tomando el factor tratamiento, variable que demuestra que unidad experimental es más eficiente al finalizar experimento.

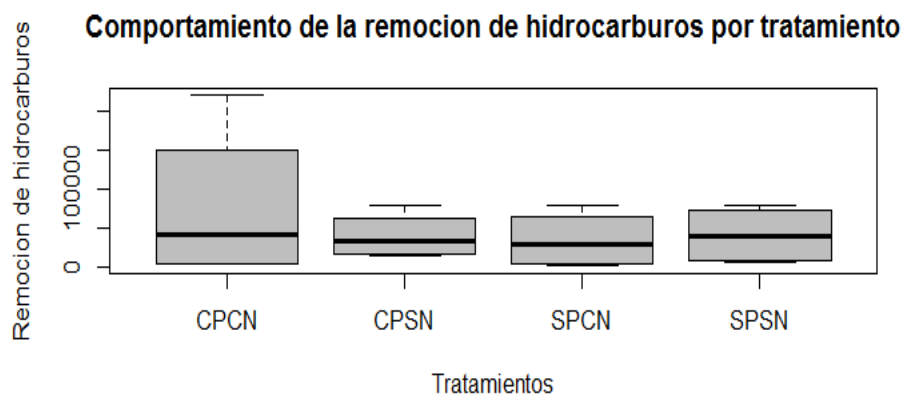
### 3.3.1 Análisis de varianza

El análisis de varianza nos permite conocer la variación o diferencias significativas en el factor de interés, para la eficiencia de las unidades experimentales.

**Tabla 14.** Análisis de varianza

	DF	SS(sum sq)	MS(Mean Sq)	FC	Pr>FC
Tratamiento	3	4,65E+09	1549935186	0,43666	0,73081
Residuales	12	4,26E+09	3549504531		
Total	15	4,72E+10			
CV	126,2%				

Según la prueba Análisis de varianza (ANOVA), no existen diferencias significativas entre las medias de remoción para los tratamientos, ya que, el p-valor para probar la hipótesis de igualdad de medias es superior a 0.05 por lo que no se rechaza dicha hipótesis. Además se cumplen los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para los residuales, por lo que los resultados obtenidos en el ANOVA son confiables.



**Gráfica 12.** Comportamiento de la remoción de TPH por tratamiento.

Observando el comportamiento de la remoción de hidrocarburos en cada uno de los tratamientos, se observa que es posible que no exista diferencias significativas de medias entre los tratamientos, debido que las líneas centrales en todas las cajas están casi a la misma altura. Para corroborar esta suposición se realiza una prueba de análisis de varianza con el fin de determinar si existen diferencia en las medias de los tratamientos.

### 3.3.2 Matriz de correlación

La matriz de correlación nos explica cómo se encuentran relacionadas cada una de las variables con otra variable. Su diagonal siempre contendrá el valor de uno (1). Si tiene un valor cero (0), nos indicará que no tiene ninguna relación con esa variable, por lo menos no lineal; es decir, pueda que tenga una relación cuadrática o de otro grado.

**Tabla 15.** Matriz de Correlación.

	<b>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>Ph</b>
<b>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	1,000000	-0,1104908	0,4706051
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,1104908	1,00000000	-0,7423525
<b>pH</b>	0,4706051	-0,7423525	1,00000000

En la tabla 15, se observan bajas correlaciones entre los parámetros utilizados, a excepción del pH con NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, el cual presenta una alta correlación en forma inversa, es decir a mayores valores de pH se esperan menores valores de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

#### 4. CONCLUSIONES

- El análisis estadístico no demostró diferencias significativas en las medias calculadas en las cuatro (4) unidades experimentales utilizadas para el tratamiento de TPH.
- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial alcanzaron una remoción de TPH superior al 90%, a excepción del humedal con planta y sin nutriente que obtuvo remoción de 83,7%.
- El nutriente NPK 15-15-15 utilizado representó una variable relevante para el proceso de remediación de TPH. Las unidades experimentales que contaron con este factor presentaron la mayor remoción de TPH.
- Los parámetros estudiados pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_3^+$  y  $\text{PO}_4^-$ , presentaron un comportamiento considerado como normal en el proceso de remoción de TPH.
- El sistema de humedales artificiales demostró ser eficiente en el proceso de remoción de TPH.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Mantener un mayor control sobre las condiciones del medio utilizado donde se realizará el experimento.
- Analizar eficiencia para otras especies vegetales nativas de la zona para la remoción de TPH.
- Agregar un sistema de tratamiento primario para mayor remoción del contaminante.
- Realizar un estudio de la planta y el sustrato, con el objetivo de determinar la cantidad de TPH retenida en estas.
- Realizar este experimento en condiciones anaeróbicas para evaluar la eficiencia de remoción con respecto al trabajo realizado.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

Carrasco, M.; Ore, J. 2000. Tratamiento de las borras ácidas producidas en la manufactura de las bases lubricantes del tipo LCT en la refinería de Talara Perúl. Tesis de Magister en Ingeniera Ambiental, Universidad de Carabobo Valencia, Venezuela.

Narváez, S. 2005. Selección de bacterias aisladas de sedimentos del caribe colombiano con capacidad degradadora de hidrocarburos. Tesis de pregrado en Microbiología Industrial. Facultad de Ciencias. Departamento de Microbiología. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

Moncada, A. 2016. Análisis del desempeño y operación de humedales contruidos de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de agua residual doméstica en países tropicales. Tesis en Ingeniería Ambiental, Universidad Católica de Manizales, Manizales.

Valderrama, L. 1996. Uso de dos especies de macrófitas acuáticas, *limnobium laevigatum* y *eichhornia crassipes* para el tratamiento de aguas residuales agro industriales. Revistas de la Facultad de Ciencias. 3(1-2):1-16.

Decreto 3930, Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley

2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C., Colombia (2010).

Decreto 4741, Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá, D. C., Colombia (2005).

Decreto 1521, Por el cual se reglamenta el almacenamiento, manejo, transporte y distribución de combustibles líquidos derivados del petróleo, para estaciones de servicio. Bogotá, D. C., Colombia (1998).

Decreto 321, Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas. Bogotá, D. C., Colombia (1999).

Resolución 1170, Por medio de la cual se dictan normas sobre estaciones de servicio e instalaciones afines y se deroga la Resolución 245 del 15 abril de 1997. Bogotá, D. C., Colombia (1997).

Ley 1252, Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D. C., Colombia (2008).

Lara, J. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Reed S., Crites R. and Middle brooks E. 1995. Natural systems for waste management and treatment. McGraw Hill second edition.

Kamath R.; Rentz J., Schnoor J.; Alvarez P. n.d. Phytoremediation of hydrocarbon contaminated soils: principles and applications. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Iowa, Iowa City, Iowa, U.S.A.

Stottmeister U.; Wiessner A.; Kusch P.; Kappelmeyer U.; Kästner M.; Bederski O.; Müller R.; Moormann H. 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, N° 22. p93 – 117.

Imfeld G, Braeckevelt M, Kusch P.; Richnow H. 2009. Monitoring and assessing processes of organic chemical removal in constructed wetlands. *Chemosphere*, 74(3): 349-362.

Peña R.; Van Ginneken, M., P. 2003. Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. *Ingeniería y competitividad*, 5(1): 27-35.

Vélez, M.; Paredes, D. 2007. Remoción de metales en humedales artificiales. En: Seminario internacional “Fundamentos y diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales”. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, febrero 22– 24 de 2007.

Jones, D.; Hodge A.; Kuzyakov Y. 2004. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *Tansley review. New phytologist*. 163(3): 459 – 480.



- Vasallo, J.; Herrera, D. 2002. Seminario de hidrocarburos. Escuela Superior de Salud y Ambiente. Universidad Nacional del Comahue. Neuquén. Argentina.
- Mitsch, W.; Gosselink, J. 1986. Wetlands. Chapter, Biochemistry of wetlands. Van Nostrand Reinhold. New York. ISBN: 0-442-26398-8, p89 – 125.
- Kirkpatrick, W.; White P., Wolf, D.; Thoma, G.; Reynold C. 2006. Selecting plants and nitrogen rates to vegetate crude oil contaminated soil. International journal of phytoremediation. 8(4):285-97.
- Valero, M. 2006. Aplicación tecnología de las macrófitas la depuración de aguas residuales con la ayuda de microorganismos. Monografía de Especialidad en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Rubio, D.; Páez, J. 2009. Evaluación de los parámetros involucrados en la remoción de Cinc en humedales artificiales verticales. Tesis en Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle, Bogotá.
- Ñustez, D. 2012. Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible. Tesis de Magíster en Ecotecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Martínez, G. 2011. Medidas de Crecimiento y su Dinámica en Organismos Multicelulares. Disponible: <https://es.scribd.com/doc/62280900/Medidas-de-crecimiento> [15 de abril de 2017].
- Velasco, F.; Espinosa, C. 2010. Evaluación de la fitorremediación en términos de remoción carga orgánica, tratando aguas residuales contaminadas con

hidrocarburos. Tesis Tecnólogo en química, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

Vargas, L., Prieto, V.; Martínez, A. 2009. Remediación del derrame de hidrocarburos en el caso Barreal-Belén, Costa Rica. *Tecnología en marcha*, ISSN : 2215-3241 (en línea), 22(4): 3-17. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=22308>. Acceso: 10 de abril (2017).

Gómez, L.; Gómez, M. 2015. Métodos utilizados para el tratamiento de las borras de tanques de almacenamiento en la industria del petróleo. Disponible en: [http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2867/1/M%C3%A9todos%20utilizados%20tratamiento\\_G%C3%B3mez\\_2015.pdf](http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2867/1/M%C3%A9todos%20utilizados%20tratamiento_G%C3%B3mez_2015.pdf). Acceso: 19 abril (2017).

Pulgarín, M. 2012 Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de sedimentos contaminados con hidrocarburos procedentes de las estaciones de servicio en Risaralda. Tesis Magister en Ecotecnología. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

Mezquida, R., Oviedo, L., y Lara, C. Biodegradación in vitro de aguas borras de diésel mediante el uso de un consorcio microbiano nativo aislado en Córdoba, Colombia. *Biotecnología Aplicada*, ISSN: 1027-2852 (en línea), 32(2), 2101-2105.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S102728522015000200002&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S102728522015000200002&script=sci_arttext). Acceso: 12 Marzo (2017).

Hunt, R. 1990. Basic plant growth analysis. Academic press, London.

Navarro, A.; Vázquez A.; Marrugo J. 2008. Eficiencia de un humedal piloto con operación intermitente. Memorias del Congreso Internacional en gestión sostenible del agua: reutilización, tratamiento y evaluación de la calidad (J. Morató y G.A. Peñuela, eds). Editorial Red Alfa TECSPAR, Medellín, Colombia.

Osnaya Maricarmen.2012. Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Tesis Licenciado en Ciencias Ambientales, Universidad del Sierra Juárez, México.

Salazar, D. 2015. Evaluación in-vitro de la tolerancia a aguas borras por consorcios bacterianos aislados de lagunas de oxidación de borras en cerete-Colombia. Tesis Magister en Biotecnología, Universidad de Córdoba. Montería, Sede Central.

Suárez, L. 2011. Desarrollo de un Método Químico para Recuperacion de Crudo a Partir de las Borrás Generadas en los Procesos de Mantenimiento de tanques y Tuberías en Distritos de Produccion Petroleros de Colombia. Tesis de Magister Ingenieria Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, sede Central.

Burgos, P. 2014. Tratamiento de efluentes de baño de ganado contaminados con cipermetrina, en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto. Tesis Ingeniero Ambiental, Universidad de Córdoba. Montería, Sede Central.

Cooper; P., Job; G.; Greenand, M.; hutes, R.1996. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment, WRc, Swindon.

Delgadillo, O.; Camacho, A., Pérez, L; Andrade, M. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Revista Scielo, (en línea), ISSN 1870-0462, 14(2), agosto 2010, [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-04622011000200002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002), Acceso 15 de abril (2017).

Dueñas, M.; Santos, L. 2006. Evaluación de la bioestimulación (bacterias nativas y comerciales) en la biodegradación de hidrocarburos en suelos contaminados. Tesis Biologo, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga.

Acuña, J., Tonín, L.; Díaz, V.; Pucci N.; Pucci H. 2012. Optimización de un sistema de biorremediación de hidrocarburos a escala de laboratorio. Ingeniería. Investigación y Tecnología, ISSN 1405-7743 (en línea) ,13(1), 2012. <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v13n1/v13n1a11.pdf>. Acceso: 20 marzo (2017).

Arango, S.; Pérez, A. 2012. Montaje y estandarización de un método para la determinación de hidrocarburos totales en matrices de agua por medio de las técnicas de infrarrojo y ultravioleta. Tesis Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

Eaton A, American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21ed. Washington DC: APHA-AWWA-WEF; 2005.

Frick C.; Farrell R.; Germida J. 1999 Assessment of Phytoremediation as an InSitu Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites Prepared. By: Department of Soil Science University of Saskatchewan Saskatoon, SK Canada S7N 5A8.

Vargas, P.; Cuéllar, R., y Dussán, J. 2004. Biorremediación de Residuos del Petróleo. Ecopetrol. Hipótesis. Apuntes Científicos Uniandinos, (4). Colombia.

Grijalva, P. 2003. Evaluación de una técnica colorimétrica para la determinación de hidrocarburos totales en muestras de agua. Tesis Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Torres, K. 2014. Análisis de los impactos ambientales generados por el tratamiento y disposición final de los residuos aceitosos (borras) generados en los distritos de producción de hidrocarburos. Tesis Magister en Medio Ambiente y Desarrollo, universidad Nacional de Colombia, Bogotá, sede Central.

Wallace, S.; Knight, R. 2006. Small Scale Constructed Wetland Treatment Systems. Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements. WERF Final Report. IWA Publishing, Alexandria, VA, USA, 304p.

U.S. EPA 2000. Design Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment, US EPA CERL, Cincinnati, Ohio.

ATSDR, Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 1999. Resumen de salud pública de hidrocarburos totales del petróleo. Departamento de salud y servicios humanos de los EE.UU.

Reed S.; Crites R.; Middle brooks E. 1995. Natural systems for waste management and treatment. McGraw Hill second edition

Todd, J.; Brown, E. J.; Wells, E. 2003. Ecological design applied. *Ecological Engineering*, 20(5): 421-440.

Kelley, C.; Gaither, K.; Baca-Spry, A.; Cruickshank, J. 2000. Incorporation of phytoremediation strategies into the introductory chemistry laboratory. *Chem Educator*. 5:140-143.

# **ANEXOS**

## **ANEXO 1. PRUEBA DE POROSIDAD**

### **MATERIALES UTILIZADOS**

- Dos (2) probetas plásticas de 1000 ml
- 900 ml de grava gruesa
- 900 ml de grava media
- 1200 ml de grava fina
- Agua

### **PROCEDIMIENTO**

Se tomaron las dos (2) probetas plásticas de 1000 ml, una de estas fue llenada con agua hasta alcanzar su máximo. En la probeta restante se adicionó 300 ml de grava gruesa, 300 ml de grava media y 400 ml de grava fina respectivamente. Luego, se procedió a vaciar el agua de la primera probeta en la probeta que contenía la grava hasta alcanzar la superficie (esta superficie no debe ser sobrepasada), el volumen de agua sobrante en la probeta 1 es restado con el volumen total de la probeta, esa diferencia es el dato necesario para calcular el espacio poroso. Este procedimiento debe ser realizado por triplicado y ponderar los volúmenes.

### **RESULTADOS**

De la prueba realizada se obtuvieron los siguientes resultados.

<b>PRUEBA 1</b>	<b>PRUEBA 2</b>	<b>PRUEBA 3</b>	<b>PROMEDIO (<math>\Delta V</math>)</b>



395 ml	400 ml	485 ml	395 ml
--------	--------	--------	--------

Se obtuvo un promedio de 395 ml, este valor se obtuvo recreando las condiciones de las unidades experimentales, estas contaban con un 30% en grava gruesa, un 30% en grava media y un 40% en grava fina. Una vez calculado el porcentaje de porosidad, puede ser utilizado para cualquier medio que cuente con esta estratificación. Si en este medio el 100% corresponde a 1000 ml tenemos que el porcentaje de porosidad del medio es.

$$\% \text{Porosidad del medio} = \frac{395 \text{ ml} * 100\%}{1000 \text{ ml}} = 39,5 \%$$

Nuestra unidad experimental cuenta con unas dimensiones de 150 cm de largo, 70 cm de alto y 50 cm de ancho, de estos valores se obtiene un volumen de 525 litros. Con el volumen total del humedal calculado, se procede a calcular el volumen de agua que hay en los poros del medio, multiplicando el porcentaje de porosidad del medio con el volumen total del humedal, todo esto dividido entre el 100%.

$$V_{\text{agua en humedal}} = \frac{\% \text{ Porosidad del medio} * \text{Volumen total}}{100\%}$$

$$V_{\text{agua en humedal}} = \frac{39,5 \% * 525 \text{ L}}{100\%}$$

$$V_{agua\ en\ humedal} = 207,375\ L$$

El resultado obtenido es de 207,375 L.

## **ANEXO 2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE AGUA BORRA VERTIDA EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL.**

La cantidad de agua borra vertida en el humedal artificial fue del 3% del volumen total de agua contenida en el humedal.

$$V_{\text{Agua borra}} = \frac{V_{\text{Agua en humedal}} * 3\%}{100\%}$$

$$V_{\text{Agua borra}} = \frac{207,375 \text{ L} * 3\%}{100\%}$$

$$V_{\text{agua borra}} = 6,22 \text{ L}$$

El resultado obtenido es de 6,22 L.

### ANEXO 3.FORMATOS DE MUESTREO PARA AGUAS CONTAMINADAS CON AGUA BORRA

<b>Nombre:</b> Jesus Laverde - Yisel Salazar			<b>Fecha:</b> 6/12/16		<b>Muestreo:</b> 0	<b>Hora:</b> 9:00 am - 10:00 am
Muestra	pH	T(°c)	NO3	PO4	NH3	TPH
Borra diluida	6,37	31,5	9,09	0.19	< LC (1)	77720,56

<b>Nombre:</b> Jesus Laverde - Yisel Salazar			<b>Fecha:</b> 20/12/16		<b>Muestreo:</b> 1	<b>Hora:</b> 9:00 am - 10:00 am
Unidad experimental	pH	T(°c)	NO3	PO4	NH3	TPH
CPCN	5,95	32,35	84,68	1,42	9,18	220697,21
CPSN	5,08	37,46	92,07	0,42	< LC (1)	18608,88
SPSN	5,21	37,96	77,14	1,11	< LC (1)	8949,44
SPCN	4,63	37,68	90,36	0,98	4,09	51879,26

<b>Nombre:</b> Jesus Laverde - Yisel Salazar			<b>Fecha:</b> 17/01/17		<b>Muestreo:</b> 2	<b>Hora:</b> 9:00 am - 10:00 am
Unidad experimental	pH	T(°C)	NO3	PO4	NH3	TPH
CPCN	6,94	31,02	73,17	42,81	40,26	3382,17
CPSN	6,18	36,93	62,75	21,92	< LC (1)	45615,57
SPSN	5,68	38,85	81,07	10,78	< LC (1)	67746,04
SPCN	6,99	41,86	63,33	35	56,62	256,39

<b>Nombre:</b> Jesus Laverde - Yisel Salazar			<b>Fecha:</b> 14/02/17		<b>Muestreo:</b> 3	<b>Hora:</b> 9:00 am - 10:00 am
Unidad experimental	pH	T(°c)	NO3	PO4	NH3	TPH
CPCN	6,87	35,98	43,9	2,59	334,38	3938,31
CPSN	6,39	46,36	35,55	33,66	< LC (1)	12612,92
SPSN	6,59	38,12	38,57	0,26	< LC (1)	6237,84
SPCN	7,03	41,03	27,48	0,32	108,3	4538,37

#### ANEXO 4. FORMATO DE MUESTRO PARA LAS PLANTAS RECOLECTADAS


<b>Nombre:</b> Jesus Laverde - Yisel Salazar		<b>Fecha:</b> 6/12/16
<b>Muestreo:</b> 1	<b>Hora:</b> 9:00 am - 10:00 am	
Planta	Peso húmedo	Peso seco
CN	106,213	54,291
SN	120,8	73,842

<b>Nombre:</b> Jesus Laverde - Yisel Salazar		<b>Fecha:</b> 20/12/16
<b>Muestreo:</b> 2	<b>Hora:</b> 9:00 am - 10:00 am	
Planta	Peso húmedo	Peso seco
CN	106,213	54,291
SN	251,8	151,797

<b>Nombre:</b> Jesus Laverde - Yisel Salazar		<b>Fecha:</b> 17/01/17
<b>Muestreo:</b> 3	<b>Hora:</b> 9:00 am - 10:00 am	
Planta	Peso húmedo	Peso seco
CN	106,213	54,291
SN	142,61	80,102

<b>Nombre:</b> Jesus Laverde - Yisel Salazar		<b>Fecha:</b> 14/02/17
<b>Muestreo:</b> 4	<b>Hora:</b> 9:00 am - 10:00 am	
Planta	Peso húmedo	Peso seco
CN	106,213	54,291
SN	86,75	26,813

## ANEXO 5. RESULTADOS DEL LABORATORIO DE AGUAS DE LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA.

 NIT 891080031-3	<b>UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA</b>	<b>CÓDIGO:</b> <b>FLA-036</b>
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>21-12-13</b>
	<b>LABORATORIO DE AGUAS</b>	<b>VERSIÓN:</b> <b>Nº 07</b>

### INFORME N°402


**Fecha: 29/12/16**

<b>CLIENTE:</b>	UNIVERSIDAD DE CORDOBA	<b>DIRECCIÓN</b>	Cra 6ª # 76-103 Montería
<b>TELÉFONO</b>	3014752869	<b>NIT/CC #</b>	891080031-3
<b>INTERESADO</b>	GABRIEL CAMPO		

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO N°	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	<b>061216-01</b>	06/12/16	NA	NA	NA	<b>NA</b>	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		06/12/16		6.37			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		06/12/16		0.19			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		28/12/16		< LC (1)			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		06/12/16		9.09			


MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO N°	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	<b>201216-01</b>	20/12/16	NA	NA	NA	<b>SPCN</b>	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		20/12/16		4.63			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		20/12/16		0.98			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		28/12/16		4.09			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		20/12/16		90.36			



 HCT 091000031-3	<b>UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA</b>								<b>CÓDIGO: FLA-036</b>	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>								<b>21-12-13</b>	
	<b>LABORATORIO DE AGUAS</b>								<b>VERSIÓN: Nº 07</b>	

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	<b>201216-02</b>	20/12/16	NA	NA	NA	<b>CPSN</b>	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		20/12/16		5.08			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		20/12/16		0.42			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		28/12/16		< LC (1)			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		20/12/16		92.07			

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	<b>201216-03</b>	20/12/16	NA	NA	NA	<b>SPSN</b>	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		20/12/16		5.21			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		20/12/16		1.11			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		28/12/16		< LC (1)			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		20/12/16		77.14			

 NIT 091000031-3	<b>UNIVERSIDAD DE CORDOBA</b>								<b>CÓDIGO: FLA-036</b>	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>								<b>21-12-13</b>	
	<b>LABORATORIO DE AGUAS</b>								<b>VERSIÓN: Nº 07</b>	

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO N°	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	<b>201216-04</b>	20/12/16	NA	NA	NA	<b>CPCN</b>	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		20/12/16		5.95			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		20/12/16		1.42			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		28/12/16		9.18			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		20/12/16		84.68			

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO N°	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	<b>201216-05</b>	20/12/16	NA	NA	NA	<b>B</b>	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		20/12/16		5.61			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		20/12/16		1.20			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		28/12/16		1			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		20/12/16		25.64			

**OBSERVACIONES:**

**NOTAS:**

Los anteriores resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas; son de carácter confidencial y de propiedad del cliente.

El Laboratorio efectúa el muestreo según su procedimiento PLA-002.

Cuando el muestreo no está a cargo del Laboratorio, este no se hace responsable del método de obtención de las muestras ni de las condiciones de estas antes de su llegada al Laboratorio, ni se hace responsable de interpretación alguna que se haga respecto a la representatividad o validez de las muestras.


El Laboratorio asegura la confidencialidad de los resultados presentados en éste informe.

No se permite la reproducción parcial del informe sin la autorización escrita del Laboratorio.



**EDINELDO LANS CEBALLOS M.Sc**  
**COORDINADOR DE LABORATORIO**

Fin de informe N° 402

 NIT 09100001-3	<b>UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA</b>	<b>CÓDIGO:</b> <b>FLA-036</b>
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>21-12-13</b>
	<b>LABORATORIO DE AGUAS</b>	<b>VERSIÓN:</b> <b>Nº 07</b>

### INFORME N°405


Fecha: 28/02/17

<b>CLIENTE:</b>	UNIVERSIDAD DE CORDOBA	<b>DIRECCIÓN</b>	Cra 6ª # 76-103 Montería
<b>TELÉFONO</b>	3014752869	<b>NIT/CC #</b>	891080031-3
<b>INTERESADO</b>	GABRIEL CAMPO		

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO N°	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	170117-01	17/01/17	NA	NA	NA	SPCN	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		17/01/17		6.99			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		17/01/17		35			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		27/02/17		56.62			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		17/01/17		63.33			


MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO N°	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	170117-02	17/01/17	NA	NA	NA	CPSN	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		17/01/17		6.18			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		17/01/17		21.92			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		27/02/17		< LC(1)			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		17/01/17		62.75			

MUESTRA	MUESTREO
---------	----------

 NCT 091000031-3	<b>UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA</b>								<b>CÓDIGO: FLA-036</b>		
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>								<b>21-12-13</b>		
	<b>LABORATORIO DE AGUAS</b>								<b>VERSIÓN: Nº 07</b>		


TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	170117-03	17/01/17	NA	NA	NA	SPSN	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		17/01/17		5.68			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		17/01/17		10.78			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		27/02/17		< LC (1)			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		17/01/17		81.07			

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	170117-04	17/01/17	NA	NA	NA	CPCN	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		17/01/17		6.94			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		17/01/17		42.81			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		27/02/17		40.26			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		17/01/17		73.17			

 HTT 09100001-3	<b>UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA</b>								<b>CÓDIGO: FLA-036</b>		
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>								<b>21-12-13</b>		
	<b>LABORATORIO DE AGUAS</b>								<b>VERSIÓN: Nº 07</b>		

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	170117-05	17/01/17	NA	NA	NA	Blanco	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		17/01/17		3.97			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		17/01/17		1.24			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		27/02/17		1.34			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		17/01/17		38.71			


MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	140217-01	14/02/17	NA	NA	NA	CNCP	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		14/02/17		6.87			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		14/02/17		2.59			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		27/02/17		334.38			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		14/02/17		43.90			

 HCT 091C00031-3	<b>UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA</b>							<b>CÓDIGO: FLA-036</b>		
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>							<b>21-12-13</b>		
	<b>LABORATORIO DE AGUAS</b>							<b>VERSIÓN: Nº 07</b>		

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	140217-02	14/02/17	NA	NA	NA	SNSP	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		14/02/17		6.59			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		14/02/17		0.26			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		27/02/17		<LC (1)			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		14/02/17		38.57			

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NUMERO DE ALÍCUOTAS	NUMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	140217-03	14/02/17	NA	NA	NA	CNSP	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO		UNIDADES		MÉTODO		FECHA DE EJECUCIÓN		RESULTADO			
pH		Unidades de pH		4500-H+ B		14/02/17		7.03			
Fosfatos como ortofosfatos		mg/L		4500-P E		14/02/17		3.66			
Nitrógeno amoniacal		mg/L		4500-NH3 B; 4500-NH3 C		27/02/17		108.30			
Nitratos		mg/L		4500-NO3- B		14/02/17		27.48			

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE	CÓDIGO DEL	FECHA DE	PLAN DE	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA	CONDICIONES	NUMERO DE	NUMERO DE

 NIT 091000001-3	<b>UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA</b>							<b>CÓDIGO: FLA-036</b>		
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>							<b>21-12-13</b>		
	<b>LABORATORIO DE AGUAS</b>							<b>VERSIÓN: Nº 07</b>		

MUESTRA	LABORATORIO	RECIBIDO	MUESTREO Nº					POR:	AMBIENTALES	ALÍCUOTAS	MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	140217-04	14/02/17	NA	NA	NA	SNCP	NA	Cliente	NA	1	1

PARAMETRO	UNIDADES	MÉTODO	FECHA DE EJECUCIÓN	RESULTADO
pH	Unidades de pH	4500-H+ B	14/02/17	6.39
Fosfatos como ortofosfatos	mg/L	4500-P E	14/02/17	0.32
Nitrógeno amoniacal	mg/L	4500-NH3 B; 4500-NH3 C	27/02/17	< LC (1)
Nitratos	mg/L	4500-NO3- B	14/02/17	35.55

MUESTRA			MUESTREO								
TIPO DE MUESTRA	CÓDIGO DEL LABORATORIO	FECHA DE RECIBIDO	PLAN DE MUESTREO Nº	FECHA	TIPO	PUNTO	HORA	TOMADA POR:	CONDICIONES AMBIENTALES	NÚMERO DE ALÍCUOTAS	NÚMERO DE MUESTRAS
Agua de residuo de combustible	140217-05	14/02/17	NA	NA	NA	Blanco	NA	Cliente	NA	1	1
PARAMETRO	UNIDADES	MÉTODO	FECHA DE EJECUCIÓN	RESULTADO							
pH	Unidades de pH	4500-H+ B	14/02/17	4.27							
Fosfatos como ortofosfatos	mg/L	4500-P E	14/02/17	0.31							
Nitrógeno amoniacal	mg/L	4500-NH3 B; 4500-NH3 C	27/02/17	< LC (1)							
Nitratos	mg/L	4500-NO3- B	14/02/17	38.96							

OBSERVACIONES:

**NOTAS:**

Los anteriores resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas; son de carácter confidencial y de propiedad del cliente.

El Laboratorio efectúa el muestreo según su procedimiento PLA-002.

Cuando el muestreo no está a cargo del Laboratorio, este no se hace responsable del método de obtención de las muestras ni de las condiciones de estas antes de su llegada al Laboratorio, ni se hace responsable de interpretación alguna que se haga respecto a la representatividad o validez de las muestras.

El Laboratorio asegura la confidencialidad de los resultados presentados en este informe.


No se permite la reproducción parcial del informe sin la autorización escrita del Laboratorio.



**EDINELDO LANS CEBALLOS M.Sc**  
**COORDINADOR DE LABORATORIO**

Fin de informe Nº 405

# ANEXO 6. RESULTADOS DEL LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL DE LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

 NET 891080031-3	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA		CODIGO:
	INFORME DE RESULTADOS		FTX-002
	LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL		22-11-2011
			VERSIÓN:
			Nº 01

Cons. N°: 17-053

CLIENTE:	GABRIEL CAMPO DAZA		SOLICITADO POR: GABRIEL CAMPO DAZA
CONVENIO/PROYECTO:	-		
TIPO DE MUESTRA:	AGUAS		
TOTAL MUESTRAS:	16		
RESPONSABLES DE MUESTREO:	CLIENTE	RECEPCIÓN EN LABORATORIO:	S.B.
FECHA DE MUESTREO:	-	RESPONSABLES DE ANÁLISIS:	D.M.
FECHA RECEPCIÓN MUESTRAS:	14/12/2016;20/12/2016;17/01/2016;15/02/2016		
LÍMITE DE DETECCIÓN DEL MÉTODO (LDM): 0,02µg/mL para cada HC	MÉTODO DE ANÁLISIS: EPA 3510C; EPA8015C - GC-MS		

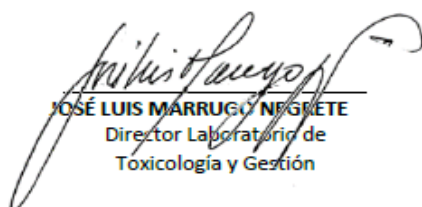
HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS SATURADOS													
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	NONANO	DECANO	UNDECANO	DODECANO	TETRADECANO	HEXADECANO	OCTADECANO	EICOSANO	TETRACOSANO	OCTACOSANO	DOTRIACANTANO	TETRAACANTANO
µg/mL													
TX-141215-64	MUESTRA AGUA CONTAMINADA CON BORRA	6,45	4,78	22,97	64,24	90,60	193,39	2018,64	162,90	111,98	13,30	ND	ND
TX-201216-01	SPCN	ND	ND	0,85	9,48	40,85	274,17	2870,54	253,70	177,38	24,59	13,05	7,05
TX-201216-02	CPCN	ND	ND	ND	2,28	21,45	147,48	1806,16	136,39	91,07	11,87	9,08	ND
TX-201216-03	CPSN	ND	ND	0,30	6,01	20,36	94,70	1239,70	99,11	60,33	10,32	ND	ND
TX-201216-04	MUESTRA B	ND	ND	0,50	15,00	37,82	105,85	1182,48	96,81	58,14	8,84	ND	ND
TX-201216-05	SPSN	ND	ND	<0,02	3,40	8,71	42,15	620,59	45,44	27,50	6,76	ND	ND
TX-170117-01*	CPSN	ND	ND	ND	ND	9,27	217,48	2153,81	191,21	147,38	41,20	6,57	ND
TX-170117-02*	BLANCO	ND	ND	ND	ND	48,21	343,92	2484,53	195,97	146,26	74,27	16,44	ND
TX-170117-03*	SPCN	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0,02	<0,02	ND	ND	ND	ND
TX-170117-04*	CPCN	ND	ND	ND	ND	0,09	2,53	76,93	8,21	5,59	1,60	2,10	ND
TX-170117-05*	SPSN	ND	ND	0,86	6,25	17,15	124,39	1583,73	142,24	100,31	22,06	2,18	ND
TX-150217-01	SNSP	ND	ND	ND	8,16	8,31	8,00	23,84	28,09	25,72	45,53	ND	ND
TX-150217-02	SNCP	ND	ND	ND	ND	0,09	0,15	0,46	0,45	0,39	0,46	ND	ND
TX-150217-03	BLANCO	ND	ND	ND	1,06	1,09	1,58	4,07	3,88	3,64	5,91	ND	ND
TX-150217-04	CNCP	ND	ND	ND	ND	8,17	5,54	12,62	17,35	21,16	45,12	ND	ND
TX-150217-05	CNSP	ND	ND	ND	ND	8,17	5,65	14,89	20,10	22,85	45,11	ND	ND



Hidrocarburos totales del petróleo (HTP – DRO+GRO) corresponden a hidrocarburos con masas entre C10 y C28 (GRO: gama de alcanos de C6 a C10 y cubre un Rango de punto de ebullición de aproximadamente 60°C-170°C. DRO: rango de alcanos de C10 a C28 y que cubre un rango de punto de ebullición de aproximadamente 170°C-430°C) típicos en perfiles de gasolina y Diesel.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	DRO+GRO (µg/L)
TX-141215-64	MUESTRA AGUA CONTAMINADA CON BORRA	77720,56
TX-201216-01	SPCN	51879,26
TX-201216-02	CPCN	220697,21
TX-201216-03	CPSN	18608,88
TX-201216-04	MUESTRA B	19421,08
TX-201216-05	SPSN	8949,44
TX-170117-01*	CPSN	45615,57
TX-170117-02*	BLANCO	66944,73
TX-170117-03*	SPCN	256,39
TX-170117-04*	CPCN	3382,17
TX-170117-05*	SPSN	67746,04
TX-150217-01	SNSP	6237,84
TX-150217-02	SNCP	12612,92
TX-150217-03	BLANCO	7621,46
TX-150217-04	CNCP	3938,31
TX-150217-05	CNSP	4538,37

**Nota Importante:** Los resultados presentados en este informe son válidos únicamente para las muestras analizadas; son de carácter confidencial y de propiedad del cliente. El laboratorio asegura la confidencialidad de los resultados presentados en este informe. El Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental no se hace responsable del método de obtención de la muestra ni sus condiciones antes de recibirlas, cuando estos procedimientos no estuvieron a cargo de del personal del laboratorio, por tanto, en estos casos no se harán interpretaciones con respecto a la representatividad o validez de las muestras.

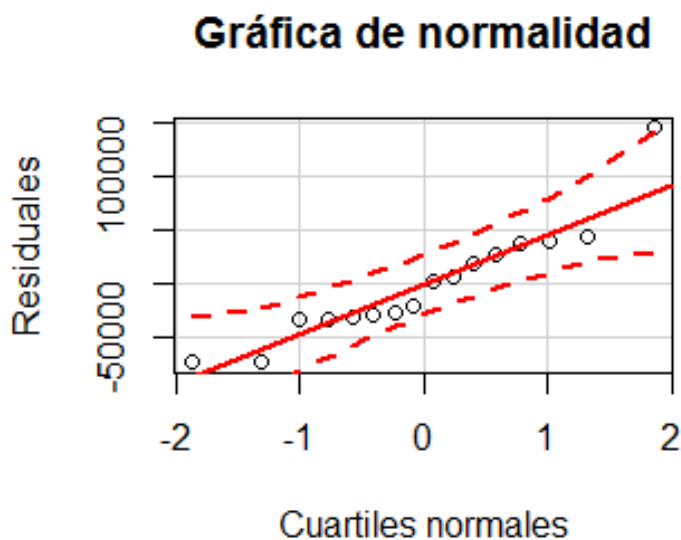
  
**JOSÉ LUIS MARRUGO NEGRETE**  
 Director Laboratorio de  
 Toxicología y Gestión

## ANEXO 7. PRUEBAS ESTADÍSTICAS PARAMÉTRICAS

### PRUEBA DE NORMALIDAD

La prueba de Shapiro-Wilks prueba la hipótesis nula de que los datos provienen de una distribución normal. Valores de P menores que 0.05 conducen al rechazo de esa hipótesis al nivel de significancia del 5%. Para los datos de remoción de TPH se obtuvo un P-valor de 0,0879, esto significa que la hipótesis no se rechaza.

```
-----  
-----  
Shapiro-wilk normality test  
p-value: 0.08790811  
According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance,  
residuals can be considered normal.  
-----  
-----
```



Este gráfico se construye de tal manera que, si los datos provienen de una distribución normal, los puntos caerán aproximadamente a lo largo de una línea recta. Para ayudar a determinar qué tan cerca los puntos corresponden a una línea recta, se puede superponer una línea de referencia en el gráfico

## HOMOGENEIDAD DE LAS VARIABLES

La prueba de Bartlett (Prueba de homogeneidad), compara un promedio ponderado de las varianzas intra-muestra con su media geométrica. Un valor de P menor de 0.05 indica una diferencia significativa entre desviaciones estándar intra-muestra a un nivel de significancia del 5%. La prueba es apropiada tanto para tamaños de grupo iguales como diferentes. La prueba realizada con los datos de porcentaje de remoción de TPH arrojó un P-valor de 0,1311, esto significa que no existe diferencia significativa entre las desviaciones estándar.

```
-----  
-----  
Bartlett homogeneity test  
p-value: 0.1311606  
According to Bartlett homogeneity test at 5% of significance, it  
is considered that the residuals have constant variance.  
-----  
-----
```

According to the F test, the means can not be considered distinct.

## ANEXO 8. EVIDENCIAS DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

